

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství  
Katedra slévárenství

**Lité kovové pěny z Al slitin**  
Cast Al metal foams

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracovala samostatně.**

V Ostravě dne 29.04.2011

.....

Irina Zyryanová

## **Poděkování**

Chtěla bych poděkovat vedoucí mé diplomové práce pani doc. Ing. Vlastě Bednářové, CSc. a konzultantovi Ing. Petru Lichému, Ph.D. za profesionální přístup a odborné rady. Svému „druhému konzultantovi“ Ing. Aleši Hanusovi, Ph.D. za ochotu a za to, že byl vždy po ruce, když jsem potřebovala pomoc.

Velké díky Ing. Petru Jonštovi, Ph.D. a Ing. Ivanu Ružiakovi, Ph.D. za provedení a vyhodnocení tlakové zkoušky. Pani Naděždě Brychtové a Miroslavě Subíkové za pomoc při přípravě metalografických výbrusů a snímků. Ing. Jaroslavu Beňovi, Ph.D. za pomoc při odlévání a Ing. Michalu Cagalovi za velkou ochotu při řezání vzorků. Sledně Ing. Nikol Špirutové za asistenci při výrobě sádrových forem. Také bych chtěla poděkovat za pomoc svým spolužákům, obzvláště Pavlu Vojáčkovi a Michalu Kandrnálovi za mužskou sílu při formování.

Děkuji svému dědovi Viktoru Stupinovi za inspiraci, odborné rady a nesmírné pochopení. Alexandru Ponamarjovovi z KUMZ a.s. za seznámení s technologií výroby kovové pěny, používané v podniku a umožnění exkurse do provozu.

## **Abstrakt**

Diplomová práce je věnována kovovým pěnám jako novému a perspektivnímu materiálu. V teoretické části diplomové práci se popisují způsoby výroby kovových pěn, jejich vlastnosti a oblasti použití. V praktické části se ověřují vybrané výrobní postupy pro zhotovení pórovitého materiálu ze slitiny hliníku. Na vyrobených vzorcích se prokazuje schopnost pórovitého kovového materiálu k pohlcování nárazové energie.

## **Klíčová slova**

Kovová pěna, hliníková pěna, pórovitý kovový materiál, výroba kovové pěny, mřížový materiál, zpěňovadlo, lehké konstrukce, absorpce energie, tlumení zvuku.

## **Abstract**

The thesis deals with metal foams as a new and advanced material. In the theoretical part of the thesis the manufacturing routes of the metallic foams, their properties and areas of application are described. The selected production methods of the cellular aluminium materials are tested in the practical part of the diploma work. The produced specimens are used to verify the ability of cellular metallic materials to absorb the impact energy.

## **Key words**

Metal foam, aluminium foam, cellular metallic material, manufacturing of metal foam, lattice block material, blowing agent, light-weight constructions, energy absorption, sound damping.



# Obsah

Úvod .....	1
1. Vlastnosti a použití .....	3
2. Výrobní postupy .....	7
2.1 Výroba porézního kovu z taveniny .....	8
2.1.1 Přímé zpěňování kovů .....	8
2.1.1.1 Použití kovu s nízkou teplotou vypařování .....	8
2.1.1.2 Vnášení plynu do taveniny kovu .....	9
2.1.1.3 Použití zpěňovadla .....	11
2.1.2 Usměrněné tuhnutí plynem přesycené taveniny .....	13
2.1.3 Tavení slisovaného kovového prášku .....	15
2.1.4 Slévárenské metody .....	16
2.1.4.1 Lití na odpařitelný model .....	16
2.1.4.2 Materiály s mřížovou strukturou .....	18
2.1.4.3 Zalití výplňového materiálu .....	19
2.2 Výroba kovové pěny z tuhé fáze .....	22
2.2.1 Spékání kovových prášků a vláken .....	22
2.2.2 Zachycování plynu v jádře .....	24
2.2.3 Zpěnění suspenze .....	25
2.2.4 Použití výplňového materiálu .....	26
2.2.5 Spékání dutých kovových kuliček .....	27
2.2.6 Reakční spékání .....	30
2.3 Elektrolytické pokovování .....	31
2.4 Vakuové napařování .....	32
3. Praktické řešení .....	33
3.1 Ověření vybraných postupů .....	33
3.1.1 Probublávání taveniny plynem .....	33
3.1.2 Použití neorganického výplňového materiálu .....	35
3.1.3 Použití organického výplňového materiálu .....	38
3.1.4 Použití odpařitelného modelu .....	38
3.1.5 Výroba materiálu s pevnou povrchovou vrstvou .....	41
3.1.6 Lití s použitím jemné polymerní pěny .....	43
3.2 Hodnocení mechanických vlastností vyrobených materiálů .....	44
3.2.1 Tlaková zkouška .....	44
Závěr .....	49
Seznam použité literatury .....	50

# Úvod

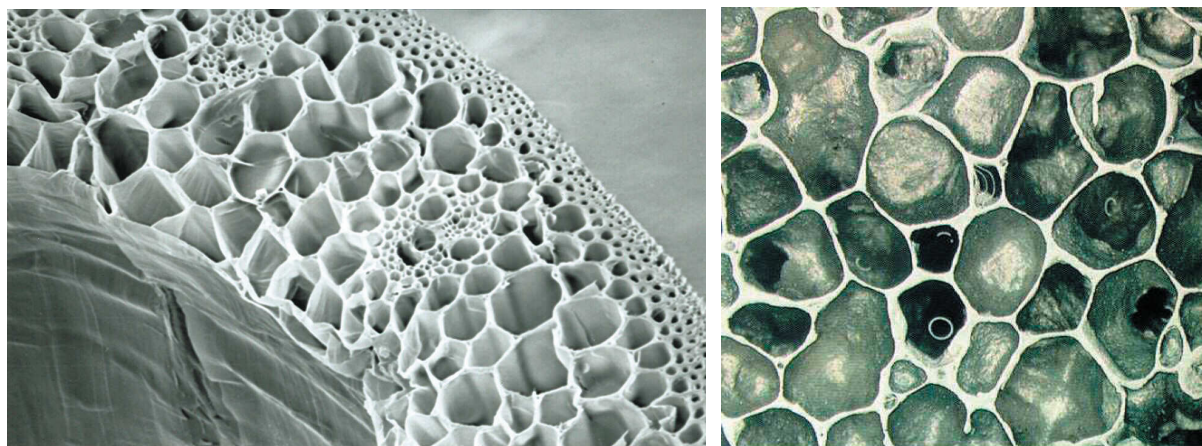
*When modern man builds large load bearing structures, he uses dense solids: steel, concrete, glass. When nature does the same, she generally uses cellular materials: cork, wood, coral. There must be good reason for it.*

*Když člověk staví velké nosné konstrukce, používá pevné látky: ocel, beton, sklo. Když příroda dělá to samé, většinou používá pórovité materiály: korek, dřevo, korál. Musí k tomu být dobrý důvod.*

Michael F. Ashby [1]

Je známo, že pěny a další vysoce pórovité materiály s buněčnou strukturou mají zajímavou kombinaci fyzikálních a mechanických vlastností, jako je například vysoká tuhost při nízké hmotnosti, nebo vysoká prodyšnost při vysoké tepelné vodivosti [2]. V přírodě se vyskytuje množství porézních organických stavebních látek, které se po celá tisíciletí znamenitě osvědčily, protože jsou schopny přenášet velké mechanické namáhání (dřevo, kosti, korály apod.). Tyto velice lehké materiály mají díky své celulární struktuře neobyčejně vysokou tuhost. Při jejich mechanickém zatížení se přenášená napětí optimálním způsobem rozloží v konstrukci, která je z nich vytvořena, přičemž nedochází k zbytečnému nadměrnému namáhání konstrukce její vlastní tíhou [3].

V současné době jsou polymerní pěny nejdůležitějším pórovitým materiálem vytvořeným člověkem, který našel uplatnění skoro v každém průmyslovém odvětví [2]. Zatím je ale méně známo, že podobné pórovité struktury lze dosáhnout i u kovů a slitin, přičemž vlastnosti kovové pěny jsou z hlediska aplikace velice zajímavé. Porovnání struktury přírodního pórovitého materiálu a struktury pěnového hliníku uvádí obrázek 1.1.



**Obr. 1.1** Vlevo: Celulární struktura rostlinné stopky. Vpravo: Struktura pěnového hliníku [3]

Pórovité kovy a kovové pěny jsou kovové materiály obsahující ve své struktuře póry, které jsou úmyslně vytvořeny. Pojmy *pórovitý kov* nebo *porézní kov* jsou obecným výrazem pro označení materiálu s velkou pórovitostí, zatím co pojmem *pěnový kov* nebo *kovová pěna* se označuje pórovitý kov vyrobený vzpěněním. Kromě toho existuje ještě termín *kovová houba*, který se používá pro vysoce porézní materiály, kde póry jsou složitě propojeny a strukturu nelze rozdělit na jednotlivé dutiny [4]. Daná práce je proto zaměřena nejen na kovové pěny v právním slova smyslu, ale i na jiné materiály, které mají podobnou morfologii.

Při volbě tématu diplomové práce jsem se domnívala, že jde o absolutně novou technologii 21. století, která se teprve začíná vyvíjet. Ovšem brzy jsem zjistila, že pórovité kovové materiály se začaly používat pro strojírenské účely již na začátku 20. století. Jako první v dvacátých letech minulého století se začaly vyrábět a komerčně využívat pěny vyhotovené spékáním kovových prášků, které se používaly pro výrobu filtrů, baterií a samomazných ložisek. První zmínky o kovových pěnách vyrobených vzpěněním materiálu nalezneme ve francouzském patentu z roku 1925 a o třicet let později v USA začíná jejich komerční použití. Ale rozsáhlá výzkumná a vývojová činnost začala až v 90. letech a pokračuje dodnes [4].

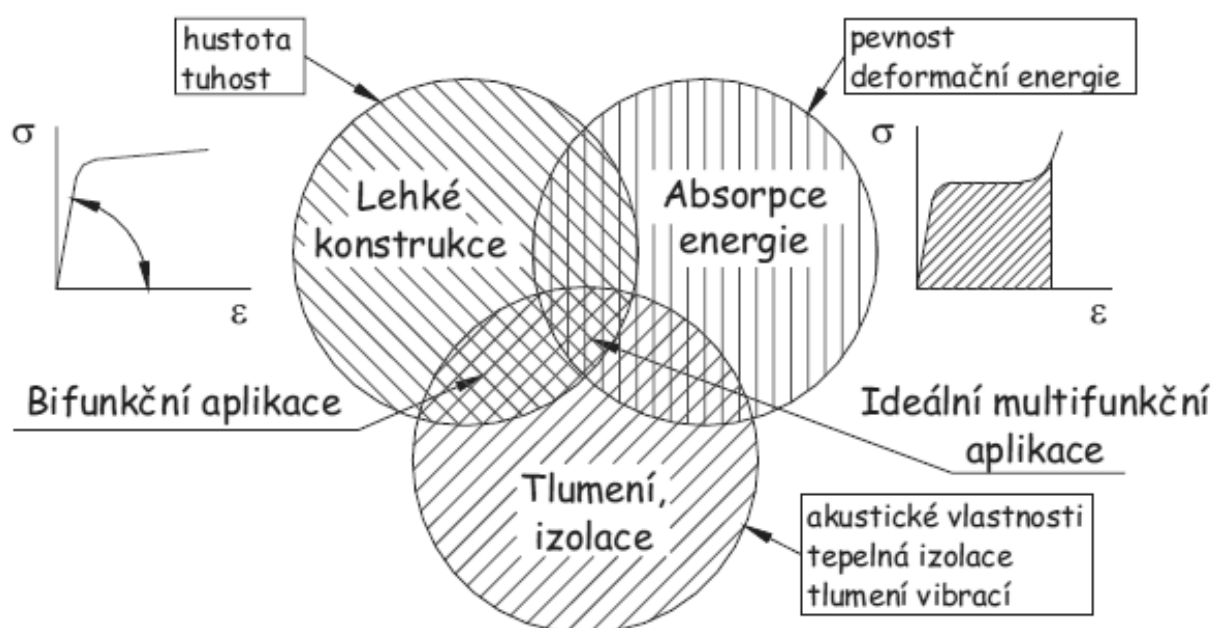
Cílem diplomové práce je studium a popis existujících metod pro výrobu kovové pěny, výroba pórovitého hliníku vybranými způsoby a hodnocení vlastností vyhotovených materiálů.

Práce je rozdělena na dvě části – teoretickou a praktickou. Teoretická část obsahuje informace o pórovitých kovových materiálech a kovových pěnách, jejich vlastnostech a oblastech použití. Popisuje základní způsoby výroby daných materiálů. Rozdělení výrobních postupů je provedeno na základě práce Johna Banhart [2], která posloužila jako základ pro sepsání teoretické části diplomové práce.

Praktická část diplomové práce je věnována ověřování vybraných slévárenských postupů pro výrobu pórovitého hliníkového materiálu. Volba metod se provádí s ohledem na existující podmínky a dostupné vybavení. Na odlitých vzorcích pórovitého hliníkového materiálu se provádí mechanické zkoušky za účelem ověřit schopnost daného materiálu absorbovat nárazovou energii.

# 1. Vlastnosti a použití

Mezi kovovými pěny nachází největší uplatnění hliník a jeho slitiny, hlavně díky své poměrně nízké hustotě ( $\sim 2700 \text{ kg.m}^{-3}$ ), nízké teplotě tání ( $660^\circ\text{C}$ ), poměrně vysoké tuhosti, houževnatosti a vynikající korozní odolnosti. Hliníkové pěny vykazují dobrou pohltivost nárazové energie a tlumicí schopnosti, výhodná je i nehořlavost a recyklovatelnost. Použití pěnového hliníku je optimální v případech, kdy se současně využívají alespoň dvě nebo více jeho předností (obr. 1.2) [3].

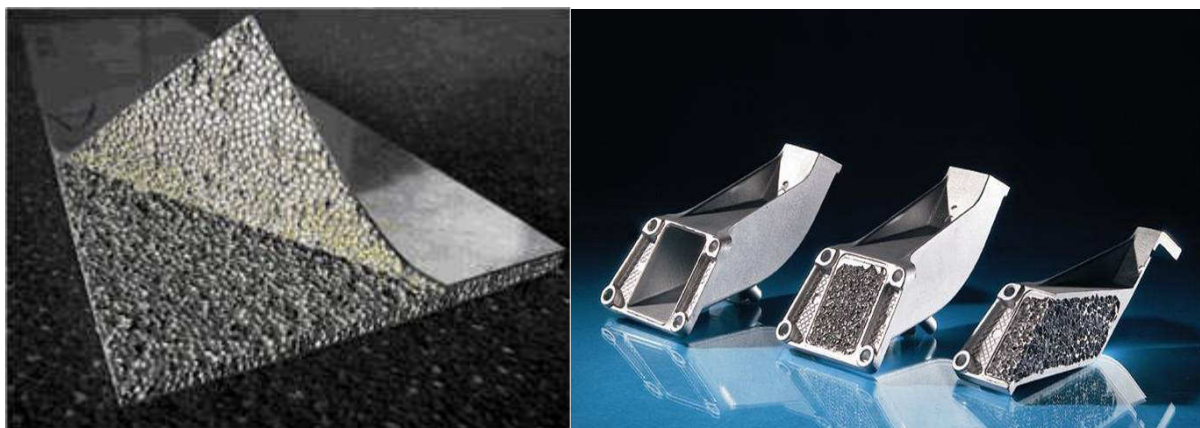


**Obr. 1.2** Aplikační možnosti vyztuženého pěnového hliníku [3]

## Lehké konstrukce

Obrovský aplikační potenciál má pěnový hliník v oblasti lehkých konstrukcí. Když se součástky z něho vyrobené vhodným způsobem povrchově vyztuží v místech, ve kterých se očekává největší tahové namáhání, lze dosáhnout výrazné snížení hmotnosti součástek při zachování požadovaných mechanických vlastností [3]. V porovnání s dutou součástkou pěnové kompozity mají lepší provozní vlastnosti, jako například vysokou tuhost a tlumicí schopnost, při nepatrném zvýšení hmotností [5].

Pěnový hliník se používá jako vnitřní část v sendvičových panelech, výplň trámových konstrukcí, trvalá jádra hliníkových odlitků (obr. 1.3) [6, 3].



**Obr. 1.3** Vlevo: Sendvičový panel z hliníkové pěny. Vpravo: Model držáku motoru pro BMV (zleva napravo: dutý odlitek, odlitek s pěnovým jádrem, řez odlitkem) [5]

### Absorpce nárazové energie

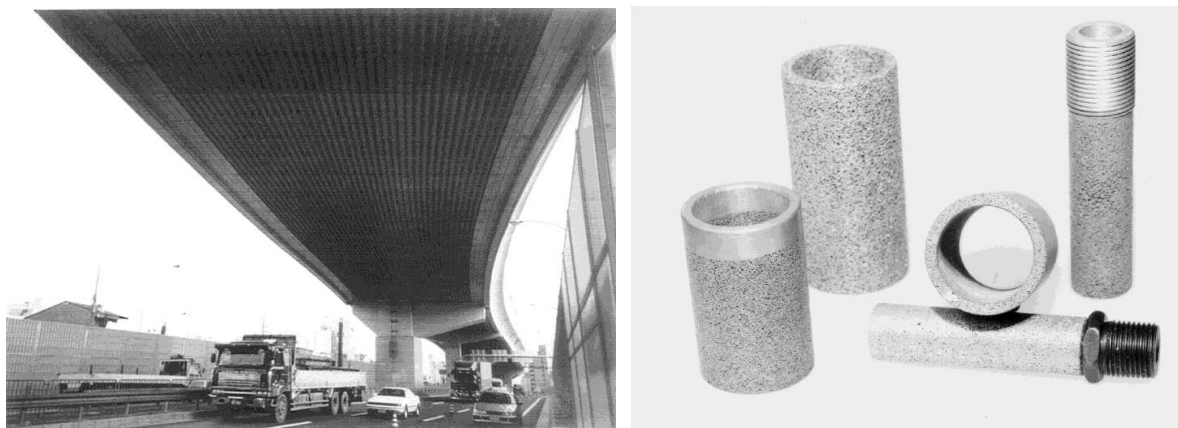
Díky své vysoce pórovité struktuře jsou kovové pěny schopny pohlcovat velké množství mechanické energie při deformaci [5, 7]. Díky této vlastnosti se používají pro deformační zóny vozidel (obr. 1.4), výtahových a dopravníkových zařízení, pro ochranné obaly přepravovaného zboží, pro lehké pancíře obrněných vozidel, letadel a vrtulníků vyztužené korundovou keramikou se zvýšenou odolností vůči průniku projektilu a účinkům tlakových vln způsobených výbuchy munice [3, 8, 9].



**Obr. 1.4** Použití hliníkové pěny pro deformační zóny automobilů [9]

## Tlumení zvuku a vibrací, tepelné vlastnosti

Součástky z pěnového hliníku mají dobrou schopnost tlumit vibrace i absorbovat hluk [3]. Na obrázku 1.5 je uveden příklad použití pěnového hliníku v konstrukci mostu pro pohlcování hluku od vozidel a ukázka tlumičů z hliníkové pěny.



**Obr. 1.5** Vlevo: Konstrukce tlumičů zvuk na spodní části mostu [10]

Vpravo: Tlumiče z pěnového hliníku [11]

Kromě toho se hliníkové pěny s otevřenými póry, díky svému velkému povrchu a vysoké tepelné vodivosti v kombinaci s dobrou korozní odolností, používají jako výměníky tepla [4, 11, 12].

Naopak tepelná vodivost hliníkové pěny s uzavřenými póry je malá [5, 12] a toho lze využít při konstrukci různých nehořlavých tepelných štítů a tepelných izolátorů. Přestože mnohé polymerní pěny mají často lepší zvukoizolační vlastnosti, nalézá pěnový hliník i pro tyto účely dobré uplatnění všude tam, kde se od něj požaduje současně vyšší tuhost nebo bezpodmínečná nehořlavost [3, 5]. Používá se zejména pro výrobu pouzder vysoce výkonných tepelných zdrojů, na výrobu průmyslových plováků odolávajících vysokým teplotám a tlakům atd. [3].

## Architektura a design

Díky své nehořlavosti, malé relativní hmotnosti a dobrým zvukoizolačním vlastnostem se kovové pěny používají pro obvodové konstrukce, zavěšené stropy podhledů, přepážky v kancelářích, kabiny výtahů, dveře, detaily nábytku atd. Příklad použití pěnového hliníku v designu je znázorněn na obrázku 1.6 [9, 13].



***Obr. 1.6*** Deska stolu z pěnového hliníku [13]

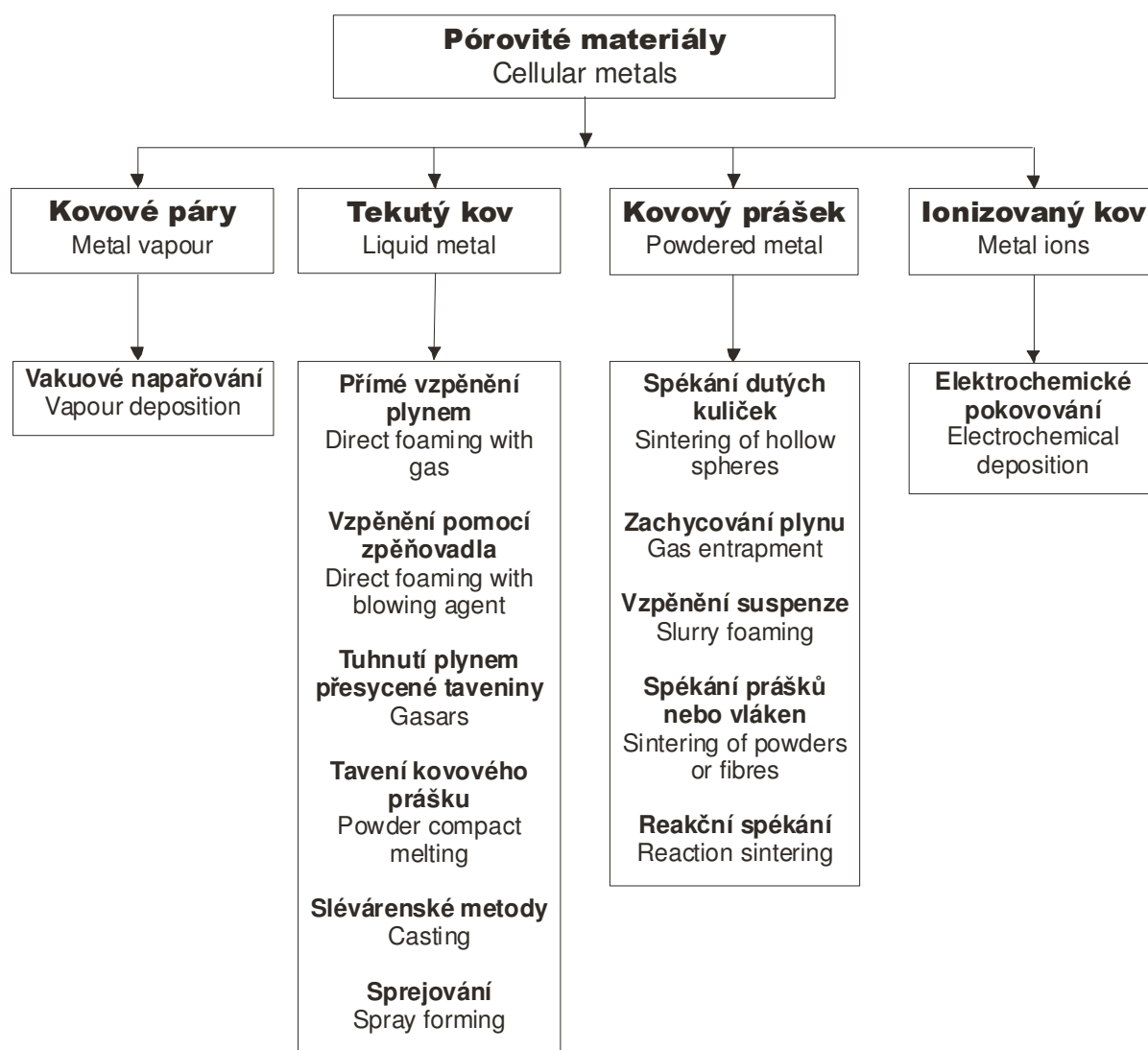
### **Další možnosti použití**

Při výrobě krytů citlivých elektronických přístrojů se využívá schopnosti elektromagnetického stínění hliníkové pěny, která pohlcuje elektromagnetické záření [3, 9]. Pěny s otevřenými póry se používají jako filtry s vysokou tepelnou a chemickou odolností. Mohou být vnitřní součástí palivových nádrží, kdy v případě havárie zabraňují rychlému vytékání hořlavých medií [12]. Existuje široká řada dalších aplikací, jako například elektrody, podklady pro katalyzátory atd. [6].

## 2. Výrobní postupy

Existuje řada způsobů výroby pórovitých kovových materiálů. Některé technologie jsou podobné postupům pro vzpěnění polymerů, naopak další jsou vyvinuty s ohledem na charakteristické vlastnosti kovových materiálů, jako je například jejich schopnost ke spékání nebo skutečnost, že mohou být elektrolyticky nanášeny.

Podle stavu, ve kterém je kov zpracováván, můžeme výrobní postupy rozdělit do čtyř základních skupin (obr. 2.1). Pórovité kovové materiály se mohou vyrábět z taveniny kovu, z kovového prášku, z par kovů, nebo z ionizovaného kovu [2].



**Obr. 2.1** Přehled výrobních postupů pórovitých kovových materiálů [2]



## **2.1 Výroba porézního kovu z taveniny**

První skupina zahrnuje procesy výroby porézního materiálu z tekutého kovu. Z roztaveného kovu se vyrábí kovová pěna buď přímým vzpěněním taveniny nebo pomocí použití polymerní pěny a nebo zalitím výplňového materiálu, který po odstranění zanechá póry ve struktuře materiálu. Další možnost výroby spočívá v natavení kovového prášku obsahujícího zpěňovadlo, které při rozkladu uvolňuje plyn [2].

### **2.1.1 Přímé zpěňování kovů**

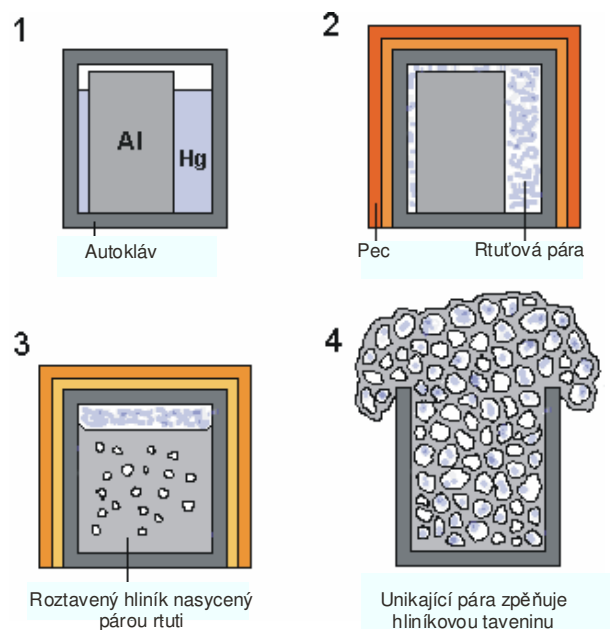
Roztavený kov může být vzpěněn za určitých podmínek vytvořením plynových bublin v tavenině. Vzniklé bubliny mají snahu vyplouvat na povrch taveniny, ale tomu lze zabránit zvýšením viskozity taveniny vlivem přidání jemných keramických částic nebo stabilizačních přísad.

V současné době existují dva způsoby přímého zpěňování taveniny kovu:

- injektáží plynu do roztaveného kovu z externího zdroje
- přidáním zpěňovadla uvolňujícího plyn do kovu [2].

#### **2.1.1.1 Použití kovu s nízkou teplotou vypařování**

První z metod výroby kovové pěny byla vyvinuta v roce 1948. Byla založena na společném tavení dvou kovů, z nichž jeden má nízkou teplotu vypařování, např. rtuť a hliník. Proces je schématicky znázorněn na obr. 2.2. Tavení se provádí v autoklávu (1), kde se kovy ohřejí na teplotu vyšší, než je teplota vypařování rtuti (2). Tlak uvnitř nádoby brání vypařování rtuti a ohřev se provádí na teplotu tání hliníku, vzniká tak hliníková tavenina přesycená parami rtuti (3). Tavenina se vyjme z autoklávu, rtuť se začne vypařovat, zvětšovat objem taveniny a vytvářet tím pěnu (4), která se ochlazuje a tuhne [14].



**Obr. 2.2** Proces výroby pěny pomocí přidání kovu s nízkou teplotou vypařování (rtuti) k základnímu kovu [14]

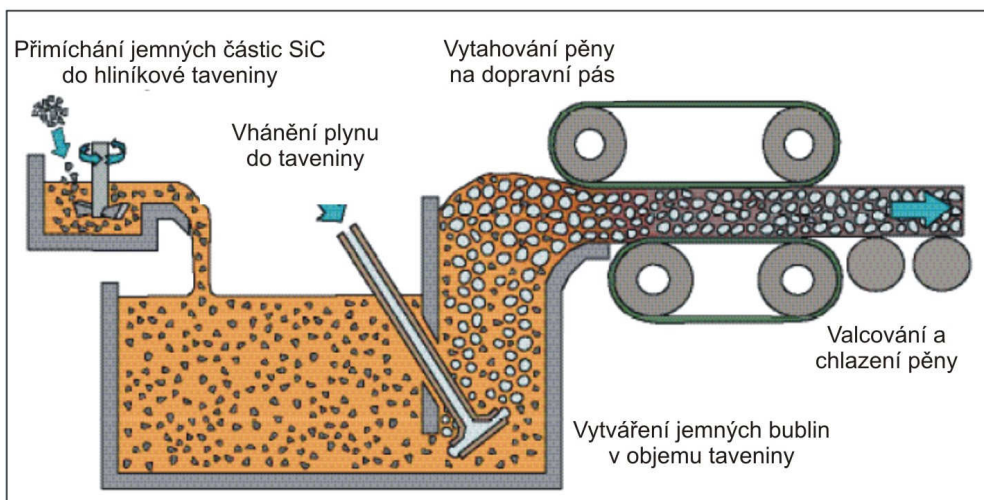
Tenhle způsob výroby neměl obchodní úspěch. Byl velice nebezpečný kvůli rychlé expanzi kovu za vysokých teplot a tlaků a také kvůli nebezpečnosti kovů určených k vypařování (rtuť, hořčík, zinek a kadmium). Vznikající pěna je nestabilní a je náchylná k zborcení během tuhnutí. Při každém dalším odlévání nelze dosáhnout stejné struktury pěny, takže výsledky jsou stěží reprodukovatelné [14].

### 2.1.1.2 Vnášení plynu do taveniny kovu

Nejjednodušší metoda vzpěnění tekutého kovu spočívá ve vhánění bublin plynu do taveniny. Hlavní podmínkou je vytvoření jemných bublin rovnoměrně rozptýlených v objemu taveniny a udržování těchto bublin v tavenině do jejího ztuhnutí [6]. Danou metodu používá kanadská společnost Cymat Aluminum Corp. na základě patentů získaných od společnosti Alcan International Ltd. a Norsk Hydro [3, 15].

Existují dva způsoby výroby pěnového hliníku (v literatuře označovaného SAF – Stabilized Aluminium Foam), a to vodorovné kontilití a nízkotlaké lití [8]. Při horizontálním kontilití (obr. 2.3, 2.4) se do hliníkové taveniny přimíchávají jemné keramické částice ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{MgO}$ ) pro zvýšení viskozity taveniny. Objemový podíl částic stabilizujících pěnu je 10 až 20%, průměrný rozměr částic se pohybuje od 5 do 20  $\mu\text{m}$  [2, 14, 16]. Optimální poměr mezi množstvím keramických částic a jejich rozměrem uvádí literatura [15, 16].

Stabilizujícího účinku lze dosáhnout volbou optimálního úhlu smáčení. Při příliš malé, rovněž jako při příliš velké smáčivosti keramických částic taveninou, nevzniká stabilizační účinek [16].



**Obr. 2.3** Plynulá výroba plátů z kovové pěny vháněním plynu do taveniny se zvýšenou viskozitou [6]

V další fázi se do taveniny pomocí speciálního odstředivého nebo vibrujícího dmýchadla vhánějí plyny (vzduch, dusík, argon), které v ní vytvářejí velmi jemné a rovnoměrně rozptýlené plynové bubliny. Vzniklou relativně stabilní hliníkovou pěnu vytahuje dopravní pás z tavicí pece, přičemž dochází k jejímu tuhnutí [3].



**Obr. 2.4** Horizontální kontilité CYMAT [8]

Pórovitost hliníkové pěny vyrobené daným způsobem se pohybuje v rozmezích od 80 do 98 %, což odpovídá hustotě 0,69 až 0,54 g.cm<sup>-3</sup>. Velikost pórů, které jsou převážně uzavřené, se udává od 3 do 25 mm, tloušťka stěn od 50 do 85 μm [2, 8, 16].

Výhodou dané technologie je možnost kontinuální výroby velkého množství pěny ( $900 \text{ kg.h}^{-1}$ ) a dosažení nízké hustoty pěnového materiálu [2, 15, 16]. Nevýhodou je nutnost ořezávání pěnového polotovaru, což znamená otevření pórů.

Technologie nízkotlakého lití trojrozměrných pěnových odlitků (obr. 2.5) je upravenou metodou nízkotlakého lití, používanou například při lití hliníkových kol. Tavenina, obsahující keramické částice se vstřikuje do dutiny formy, do které je odstředivým dmychadlem vháněn plyn a vznikající bubliny zpěňují taveninu. Danou technologií lze také vyplňovat pěnou ocelové nebo hliníkové součástky. Při nízkotlakém lití se dosahuje hustoty pěny 15 až 30 %. Hodnoty mechanických a fyzikálních vlastností pěnových materiálů a možností jejich použití uvádí technická příručka Cymat [8].



**Obr. 2.5** Výrobky z hliníkové pěny. Vlevo: Desky. Vpravo: Trojrozměrné odlitky [8]

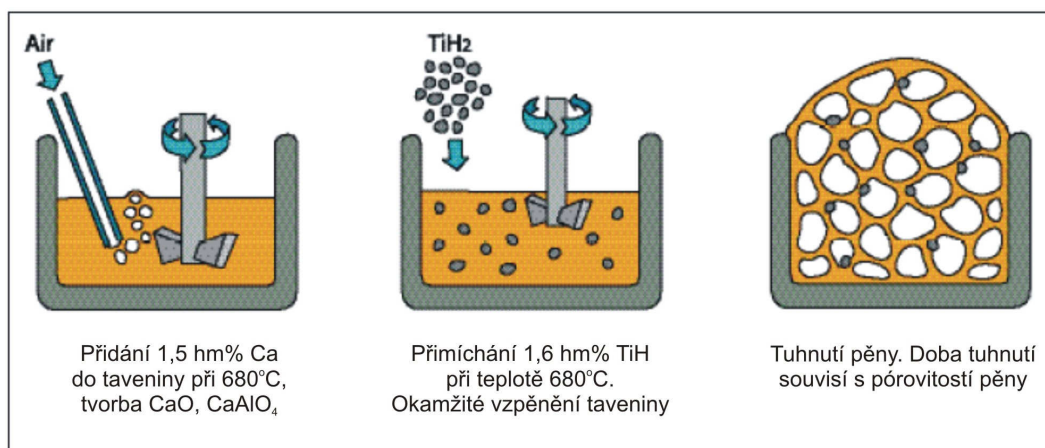
### 2.1.1.3 Použití zpěňovadla

Přímého vzpěnění kovu lze také dosáhnout přidáním zpěňovadla do taveniny. Zpěňovadlo je tvořeno práškovým materiálem nebo sloučeninou, která je stabilní za pokojové teploty, ale při tepelném rozkladu uvolňuje plyn, který vytváří v tavenině póry [2, 14].

Danou technologii, zaregistrovanou pod obchodním názvem ALPORAS používá japonská firma Shinko Wire již od roku 1986 [10]. Metoda je schematicky znázorněna na obr. 2.6. V první fázi, pro zvýšení viskozity hliníkové taveniny při teplotě  $680^{\circ}\text{C}$ , se do ní přidává kovový vápník (1,5 až 3 hm%). Tavenina se míchá po dobu několika minut a její viskozita stoupá v důsledku vzniku  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ , případně intermetalické sloučeniny  $\text{Al}_4\text{Ca}$  [2].

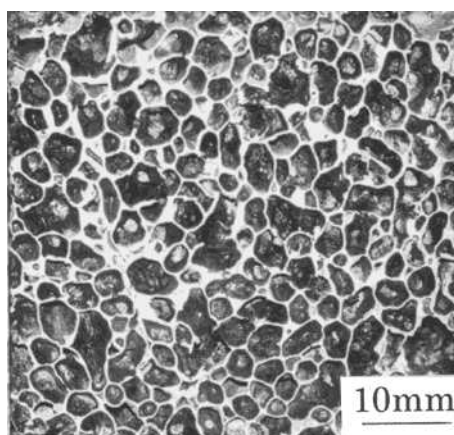
Po dosažení požadované viskozity taveniny, se do ní přidává obvykle 1,6 hm % hydridu titaničitého ( $\text{TiH}_2$ ), který se při teplotě  $680^{\circ}\text{C}$  začíná rozkládat a tím vytvářet

vodíkové bubliny [2, 3, 14, 16]. Tavenina začne expandovat a její objem narůstá, dokud se nezaplní celá dutina formy. Po ochlazení hliníkové pěny pod teplotu tání hliníku se získá tuhý blok pěnového hliníku. Takto se vyrábějí bloky o rozměrech 2400 x 700 x 450 mm s hmotností cca 180 kg, ze kterých lze získat dělením panely, desky a jiné výrobky. Hustota materiálu těchto výrobků (po odřezání souvislé povrchové vrstvy bloku) se pohybuje v rozsahu 0,18 – 0,24 g.cm<sup>3</sup> [2, 10, 16] a velikost pórů je cca 2 - 10 mm [3, 16].



**Obr. 2.6** *Přímé zpěňování taveniny o zvýšené viskozitě [6]*

Struktura pěny získané daným způsobem (obr. 2.7) je velmi homogenní [2] s uzavřenými póry [10]. ALPORAS se v současné době používá zejména v oblasti průmyslového designu, kde se využívá jeho dobrých tepelných a zvukoizolačních vlastností. Vhodné je rovněž jeho použití jako jader velmi lehkých sendvičových panelů nebo odlitků. Hlavním nedostatkem ALPORASu je jeho nízká pevnost v tahu, protože bloky z něho vyřezané nemají souvislou povrchovou vrstvu. Navíc vysoký obsah vápníku je překážkou pro jeho recyklovatelnost [3].



**Obr. 2.7** *Struktura pěny ALPORAS [10]*

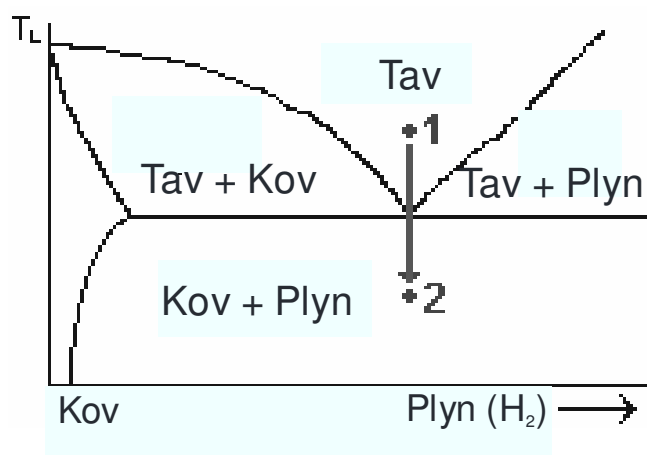


### 2.1.2 Usměrněné tuhnutí plynem přesycené taveniny

Daná metoda byla vyvinuta v roce 1980 v bývalém Sovětském Svazu [17]. Zkratka GASAR v ruštině znamená „vyztužený plynem“ [18].

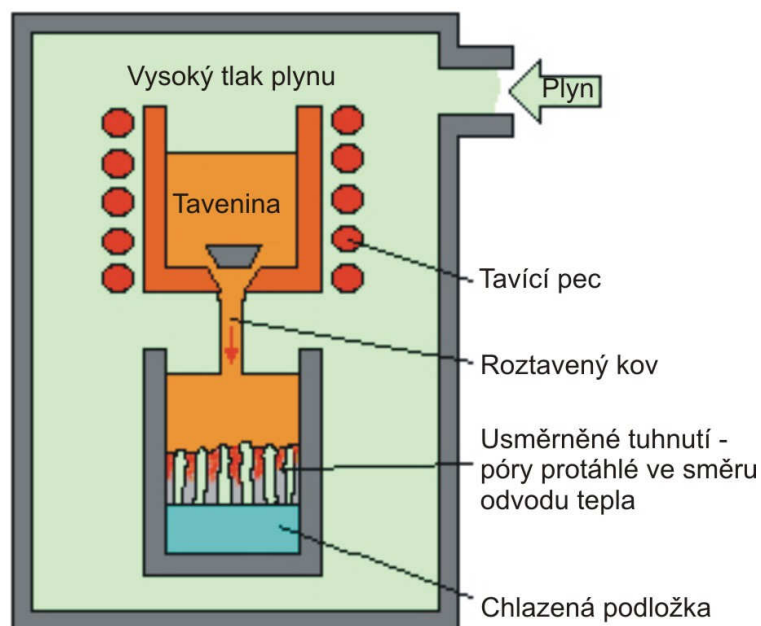
Je založená na eutektické reakci plynu, která probíhá při krystalizaci kovů nebo slitin přesycených plynem (nejčastěji vodíkem). Vodík je univerzální plyn, který se může používat s většinou kovů, s výjimkou hydridotvorných prvků jako jsou například titan, zirkon, niob, vanad atd. Pro danou technologii se také může používat dusík, avšak s řadou kovů vytváří chemické sloučeniny a proto je jeho použití omezeno. Kyslík je ještě více aktivním plynem a proto se v čisté formě používá pouze se stříbrem [17].

Metoda výroby pórovitého hliníku využívá principu tuhnutí hliníkové taveniny přesycené vodíkem. Fázový diagram Al – H<sub>2</sub> je schematicky znázorněn na obr. 2.8, kde při ochlazování taveniny přesycené vodíkem dochází při eutektické teplotě k jejímu rozkladu na hliník a vodík [14].



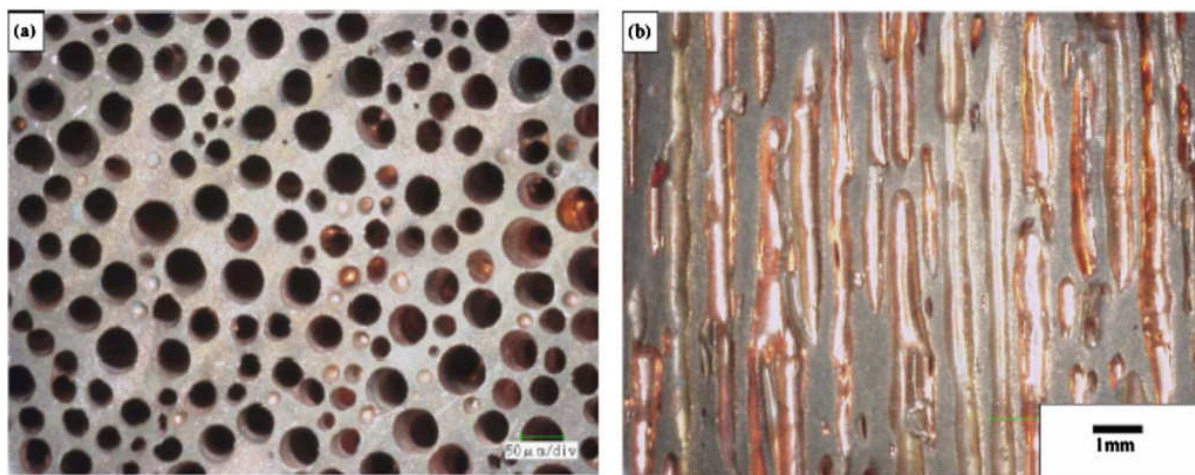
**Obr. 2.8** Schematický fázový diagram hliník – vodík [14]

Při tomto tzv. GASAR procesu (obr. 2.9) se hliník roztaví ve vodíkové atmosféře v tlakovém autoklávu s možností regulace tlaku (až do 5 MPa) [2, 14] tak, aby se dosáhlo eutektické koncentrace. Tavenina nasycená plynem se přelije do kelímku ochlazovaného ze spodu a usměrněně tuhne s rychlostí 0,05 až 5 mm.s<sup>-1</sup>. Jelikož rozpustnost vodíku v hliníku s klesající teplotou se náhle snižuje, dojde k vyloučení vodíku z přesyceného tuhého roztoku, který vytvoří v materiálu podélně protáhlé póry, orientované ve směru odvodu tepla [14].



**Obr. 2.9** Schéma GASAR procesu [14]

Struktura takto vyrobeného pěnového materiálu (obr. 2.10) je závislá na mnoha faktorech, zejména však na obsahu a tlaku vodíku, směru a rychlosti odvodu tepla, chemickém složení slitiny apod. Podélně protažené póry s průměrem 10  $\mu\text{m}$  až 10 mm a délkou od 100  $\mu\text{m}$  do 300 mm mohou tvořit 5 - 75 % objemu [14, 19].



**Obr 2.10** Lomová plocha měděné pěny vyrobené pomocí GASAR procesu

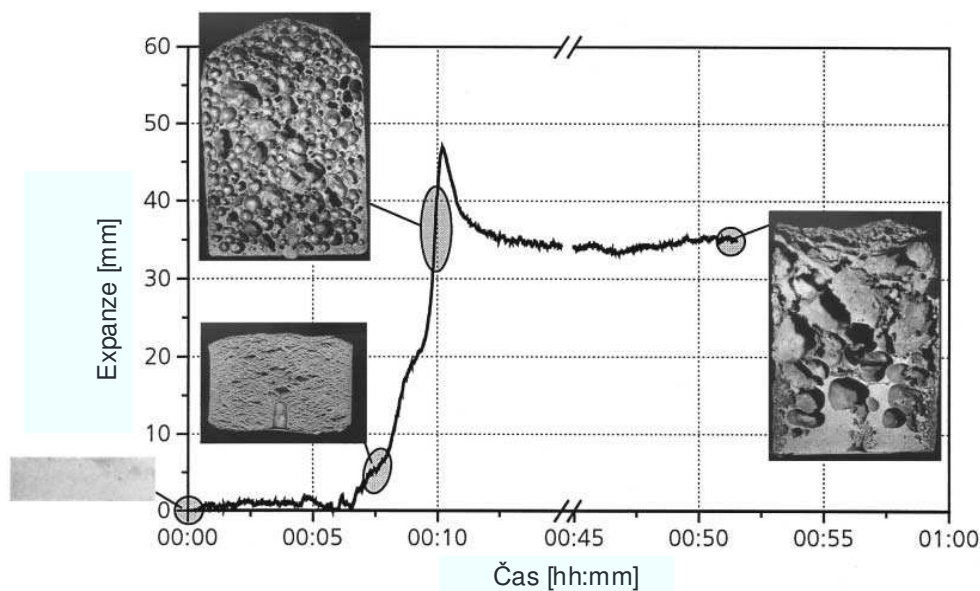
Vlevo: Kolmo ke směru odvodu tepla. Vpravo: Ve směru odvodu tepla [18]

Podobným způsobem je také možno připravit vysoce porézní struktury s jednosměrně orientovanými póry z jiných kovů, např. Cu, Ni, Mg, Ag, Au, Co, Cr a pod. Nevýhodou tohoto procesu však jsou příliš vysoké výrobní náklady a zvýšené nároky na bezpečnost [3, 14].

### 2.1.3 Tavení slisovaného kovového prášku

Výroba kovové pěny z kovového prášku (nejčastěji hliníku a jeho slitin) a práškového zpěňovadla ( $\text{TiH}_2$ ,  $\text{ZrH}_2$  nebo  $\text{CaCO}_3$ ) byla patentována již v roce 1963 Allenem (US Patent 3 087 807) [3, 15]. Daná metoda je často nazývána „práškově metalurgickou“, protože výchozími materiály jsou kovové prášky, ale vzhledem k tomu, že vzpěnění probíhá v tekutém stavu, tento postup bude popsán v této podkapitole [2].

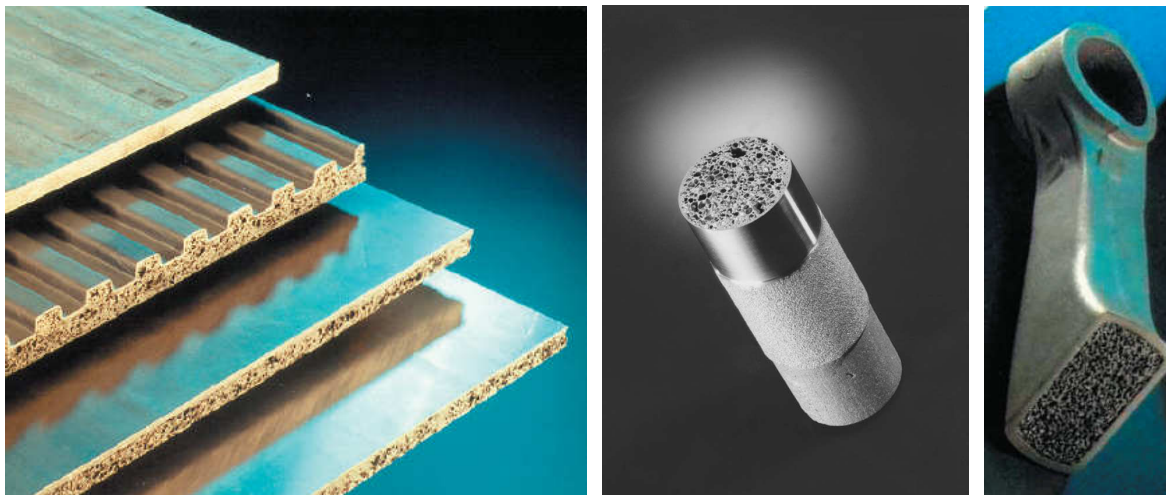
Kovový prášek se smíchá se zpěňovadlem a za studena se slisuje do polotovaru. Existuje několik metod lisování, ze kterých je protlačování nejekonomičtější, a proto je nejvíce používáno. Dalším krokem je tavení základního materiálu, při kterém dochází k rozkladu zpěňovadla, rovnoměrně rozloženého v matici. Pod vlivem uvolňovaného plynu materiál expanduje a tím vzniká vysoce pórovitá struktura. Doba potřebná k úplné expanzi závisí na teplotě a velikosti prekursoru a pohybuje se od několika sekund do několika minut [2, 16, 20]. Na obr. 2.11 je znázorněna expanzní křivka pro  $\text{Al/TiH}_2$ . Na křivce se nachází maximum, odpovídající homogenní pěnové struktuře, po kterém následuje zhroucení pěny. Maximální expanze a tedy i hustota kovové pěny se řídí množstvím zpěňovadla a nastavením technologických parametrů, například teploty a rychlosti ohřevu [2].



**Obr. 2.11** Expanzní křivka pro vzpěnění  $\text{Al/TiH}_2$  při  $750^\circ\text{C}$  [2]

Danou technologií se vyrábějí sendvičové desky se vzpěněným jádrem a konstrukční součástky z pěnového hliníku se souvislou hliníkovou povrchovou vrstvou a porézní vnitřní strukturou (obr. 2.12) [2, 3].





**Obr. 2.12** Sendvičové desky a odlitky z hliníkové pěny se souvislou povrchovou vrstvou [2, 3]

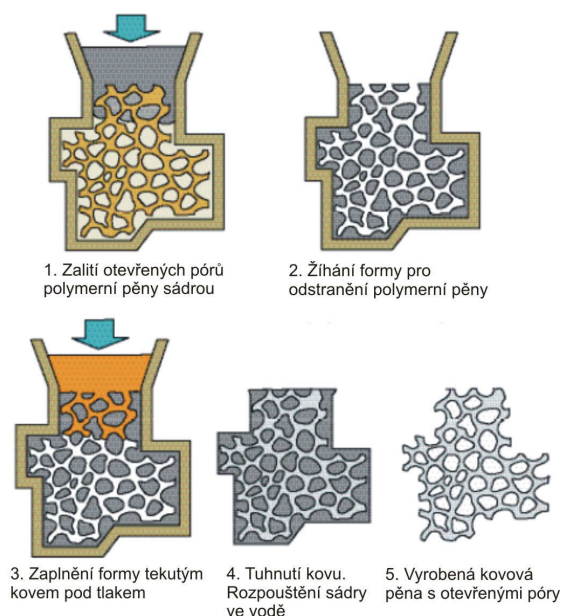
Daná technologie není omezena jenom na výrobu pěny z hliníku a jeho slitin. Dají se vyrábět pěny ze zinku, cínu, mosazi, olova, zlata a některých dalších kovů a slitin volbou vhodného zpěňovadla a technologických parametrů [2].

Hodnoty mechanických a fyzikálních vlastností kovových pěn Alulight jsou uvedeny v brožuře [9].

## 2.1.4 Slévárenské metody

### 2.1.4.1 Lití na odpařitelný model

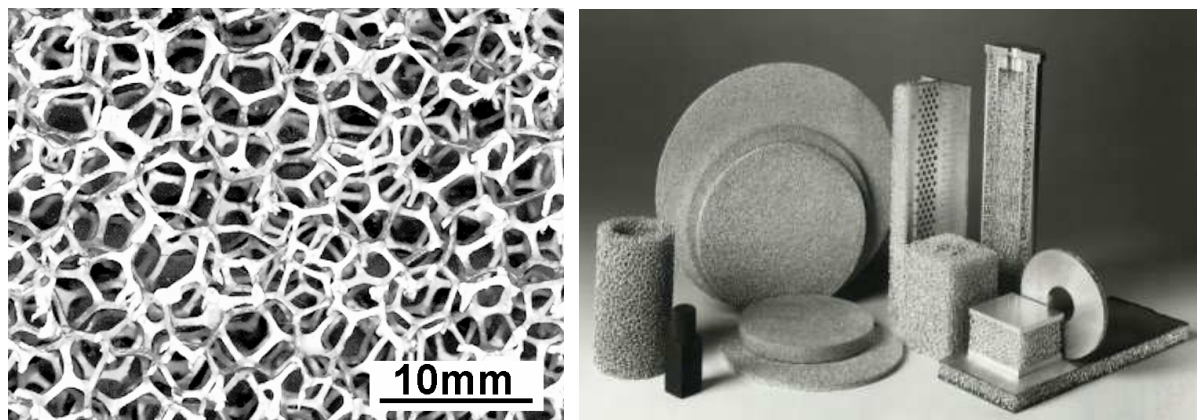
Lití na odpařitelný model z polymerní pěny se používá pro výrobu kovové pěny s otevřenými póry, která kopíruje tvar polymerní pěny [14]. Daný proces je schematicky znázorněn na obr. 2.13. Otevřené dutiny polymerní pěny se vyplní materiálem s dostatečnou žáruvzdorností, například sádkou (nebo směsí mulitu, fenolové pryskyřice a uhlíčitanu vápenatého) [2]. Poté se forma ohřeje na 700°C pro vyžhání sádky a spálení polymerní pěny [14]. Tekutý kov zaplní vzniklé dutiny a zkopíruje tak strukturu polymerní pěny. Pro zvýšení zabíhavosti se může používat kombinace vakuového a tlakového lití a předehřívání formy. Po odstranění sádky se získá kovová pěna, která je přesnou kopií polymerní pěny (obr. 2.14 vlevo) [2, 14].



**Obr. 2.13** Schéma výrobního postupu kovové pěny s otevřenými póry s použitím modelu z polymerní pěny [6]

Touto technologií vyrábí společnost ERG, Inc., Kalifornie kovovou pěnu pod obchodním názvem Duocel již od roku 1967 [15, 21]. Pórovitost pěny se pohybuje v rozmezí 80 až 97 %, s velikostí póru 4,3; 2; 1 a 0,5 mm [2, 21]. Pěny Duocel jsou velice kvalitní, ale nevýhodou výrobního procesu je nákladnost, složitost výrobního postupu a malé objemy výroby [14, 15].

Fyzikální a mechanické vlastnosti pěny Duocel jsou uvedeny v literatuře [21]. Danou technologií lze vyrábět pěny nejenom ze slitin hliníku, ale také mědi, cínu, zinku, niklu atd. Používají se především jako výměníky tepla, tlumiče nárazu, pohlcovače zvuku a filtry (obr. 2.14 vpravo) [14, 21].



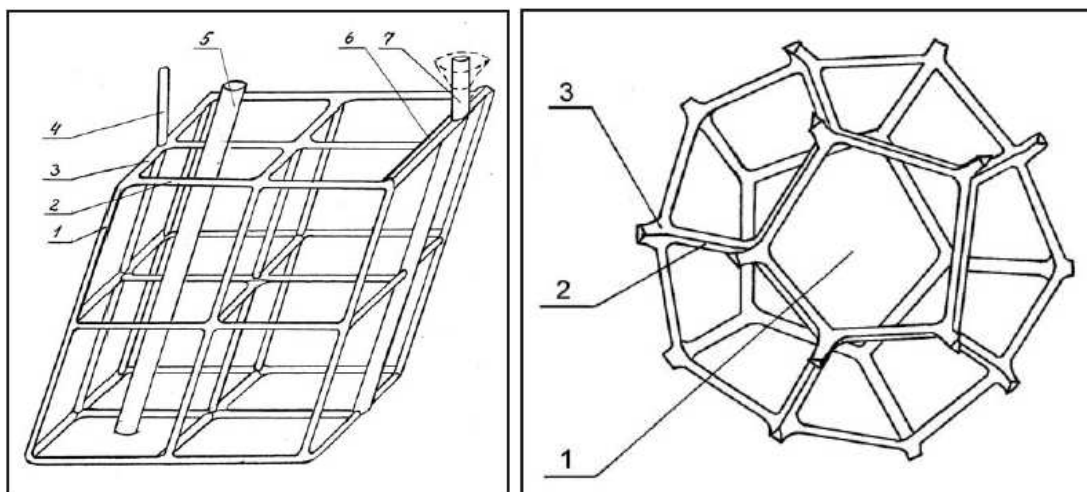
**Obr. 2.14** Vlevo: Struktura hliníkové pěny Duocel.[14]

Vpravo: Ukázka výrobků z pěny Duocel [21]

### 2.1.4.2 Materiály s mřížovou strukturou

Lití na spalitelný model se může používat pro získání vysoce pórovitých kovů s uspořádanou strukturou, v literatuře nazývaných „Lattice block materials“ (LBMs) [2].

Model může být vyhotoven vstřikováním plastických hmot do formy, postupným lepením elementů konstrukce (obr. 2.15) vrstva po vrstvě, nebo složitější tvary mohou být vyráběny metodou Rapid Prototyping [22, 23, 24].



*Obr. 2.15 Model prostorové mřížky [22]*

Vyhotovená konstrukce (z vosku nebo polystyrénu) se používá jako spalitelný model, a získaný kovový odlitek (obr. 2.16) má stejně uspořádanou strukturu jako model s přesně definovaným tvarem a velikostí pórů. Typická vzdálenost mezi žebry mřížky je 6,5 až 25 mm a průměr žebry 1,5 až 3,8 mm. Pro danou metodu se dá použít jakýkoliv slévateľný kov nebo slitina a výhodou procesu je možnost dosažení optimálních a předvídatelných mechanických vlastností materiálu [2].



*Obr. 2.16 Detail hliníkového mřížového odlitku [25]*

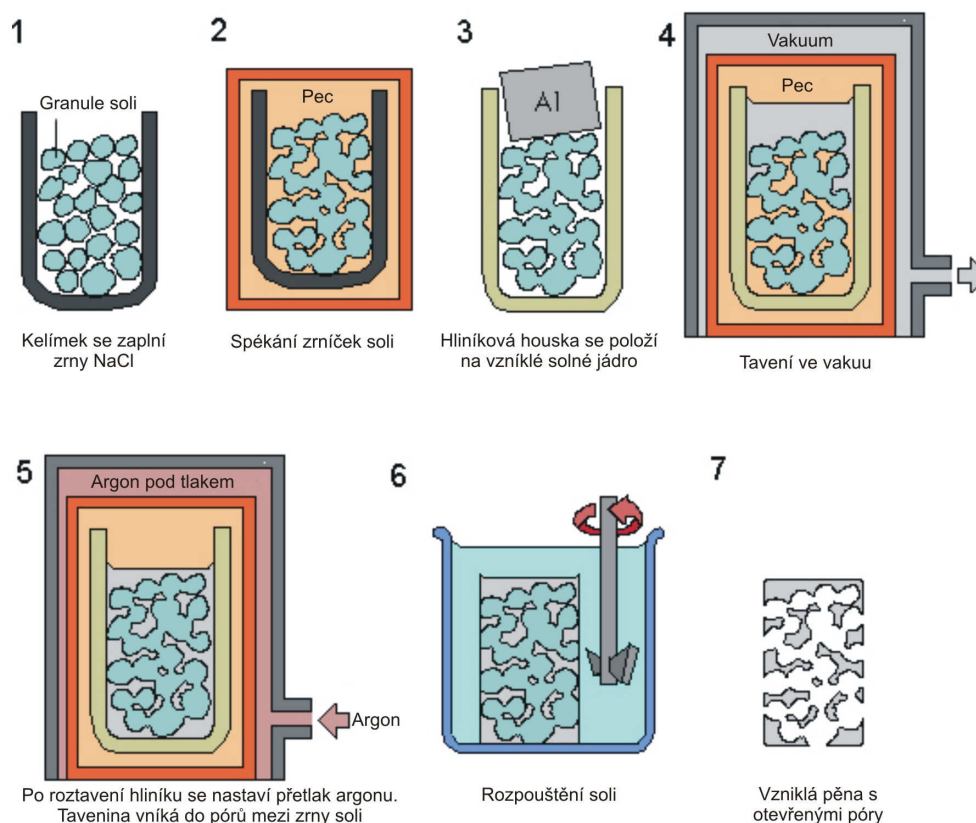
### 2.1.4.3 Zalití výplňového materiálu

Pórovité kovy se dají vyrobit metodou, kdy se tekutý kov zalije do formy vyplněné anorganickými (nebo dokonce i organickými) granulemi, anebo přidáním granulí přímo do taveniny kovu. Tyto granule mohou buď zůstat v odlitku (jedná se o tzv. „syntaktickou pěnu“), nebo se odstraní loužením nebo vyžháním. Granule lze odstranit pouze v tom případě, jestliže jejich obsah je tak velký, že všechny granule jsou vzájemně propojeny. Jako náplň se používá vermikulit, kuličky z vypálené hlíny, sůl, kuličky písku, kuličky z pěnového skla nebo duté kuličky oxidu hlinitého [2].

Jako organický výplňový materiál se mohou používat **polymerní kuličky**. Při dané metodě se hliník rychle vstříkne do formy obsahující částice polystyrénu obalené vrstvou pryskyřice, a kov ztuhne dřív, než se polystyrén rozloží. Pórovitost pěny dosahuje 73 až 86 % a rozměr pórů se pohybuje v rozmezích 1 až 3 mm [26]. Injektáž kovu do dutiny formy se musí provádět pod tlakem, aby kov pronikl do pórů velmi rychle, během cca 0,2 vteřiny, dřív než se rozloží polystyrén. Kvůli tomu se mohou vyrábět pouze malé vzorky [14]. Kompozitní materiál skládající se z kovu, polystyrénu a pryskyřice se umístí do pece (cca 400°C) na dobu několika minut pro odstranění polystyrénu a pryskyřice [26].

Další možnost výroby pórovitého kovu spočívá v použití **preformy rozpustné ve vodě**. Tato metoda byla vyvinuta ve švýcarském federálním technologickém institutu. Forma se zaplní materiálem, který je rozpustný ve vodě a který vydrží teploty roztaveného kovu. Vzhledem k nízké ceně se používá kamenná sůl, která se střešá ve formě dokud se nedosáhne požadované hustoty (obr. 2.17 - 1). Potom se sůl speče (2) a ochladí. Natavením a slepením zrn soli v místech kontaktů se vytvoří pevný celek ze soli kopírující tvar dutiny formy s otevřenými kanálky v místech mezi zrny (3). Při nejjednodušším postupu se roztavený hliník nalije do formy a zaplní kanálky. Odlitek se poté vyndá z formy, ochladí se a ponoří do vody, aby se sůl rozpustila (6). Tímhle způsobem se odlévá pěna s otevřenými póry, které svou velikostí a rozložením odpovídají granulím soli, místo kterých vznikly [14]. Minimální velikost pórů je cca 1 mm, pórovitost dosahuje 60 - 70 % [15].

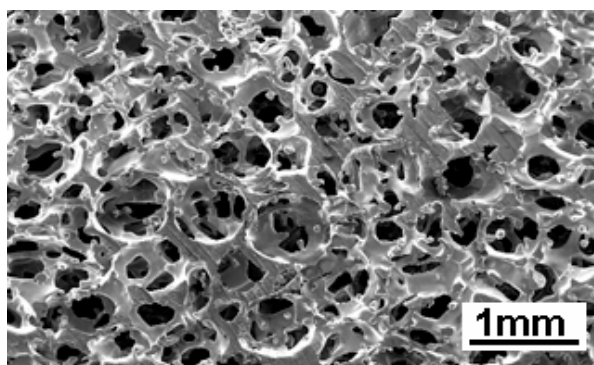
Při použití jemného solného prášku se využívá zvýšeného tlaku pro infiltraci soli hliníkem. Preforma ze soli se udržuje ve vakuu, dokud se hliník natavuje na jejím povrchu (4), a při následující infiltraci místo vakua působí vysoký tlak inertního plynu (5). Sůl se poté odstraní rozpouštěním ve vodě (6) a vznikne pěna s otevřenými póry (7). Použitím vysokého tlaku plynu v průběhu infiltrace lze dosáhnout velikosti pórů až 50  $\mu\text{m}$  [14].



**Obr.2.17** Výroba pěny s otevřenými póry s použitím preformy rozpustné ve vodě [14]

Metoda umožňuje výrobu vysoce kvalitní pěny o velikosti pórů 50  $\mu\text{m}$  až 5 mm (obr. 2.18). Použité kovy nebo slitiny nesmějí reagovat se solí a s vodou, jinak na ně nejsou kladena žádná jiná omezení. Jistou nevýhodou daného postupu je, že je značně pomalý a zahrnuje mnoho operací, s čímž je spojena jeho nákladnost [14].

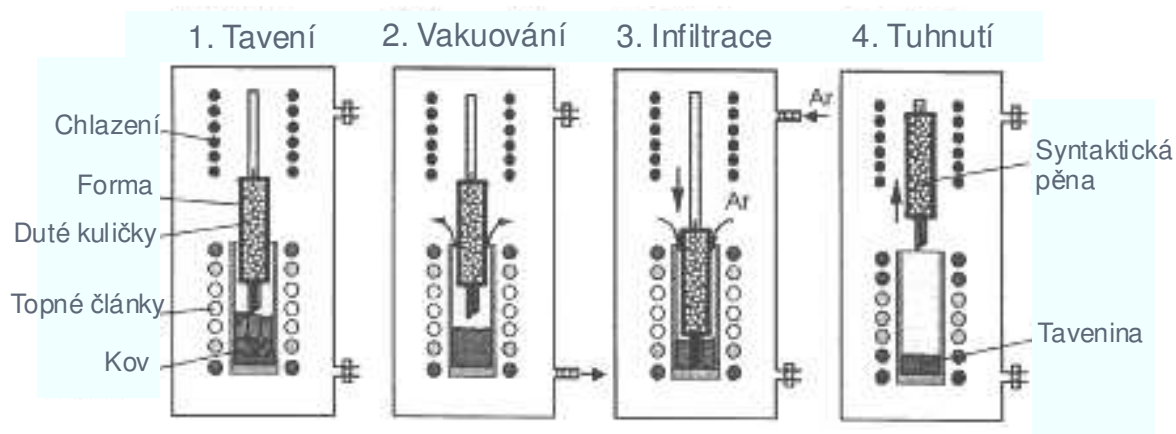
V literatuře [27] se navrhuje metoda infiltrace NaCl tekutým hliníkem ve vakuu, nezahrnující spékání soli, čímž se předpokládá snížení výrobních nákladů.



**Obr. 2.18** Pěna z vysoce čistého hliníku (99,99%) vyrobená infiltrací preformy z NaCl [15]

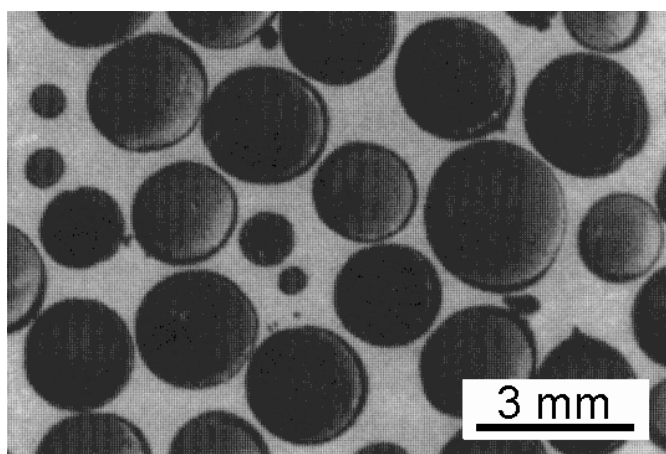


Infiltrací tenkostěnných **dutých kuliček** pod tlakem se získávají tzv. syntaktické pěny [14, 15]. Kuličky mohou být keramické (např.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) nebo vyrobené z kovu (musí mít vyšší teplotu tání, než základní kov). Kuličky se nasypou do ocelové formy a vibrací se zhustí. Kombinace vakua a tlaku inertního plynu zajišťuje zaběhnutí kovu do prostorů mezi kuličkami [2, 14]. Princip metody je znázorněn na obr. 2.19.



**Obr. 2.19** Technologie výroby syntaktické pěny [2]

Daná metoda umožňuje výrobu pěny s uzavřenými póry (kuličky zůstávají v materiálu) s homogenní a izotropní buněčnou strukturou z hliníku, hořčíku nebo titanu [14]. Pórovitost takové pěny dosahuje 53 %, průměr kuliček se pohybuje v rozmezích 0,06 – 3,7 mm, a tloušťka stěn kuliček od několika mikrometrů do 100  $\mu\text{m}$  [15]. Struktura syntaktické pěny je znázorněna na obr. 2.20.



**Obr. 2.20** Syntaktická hořčíková pěna [14]

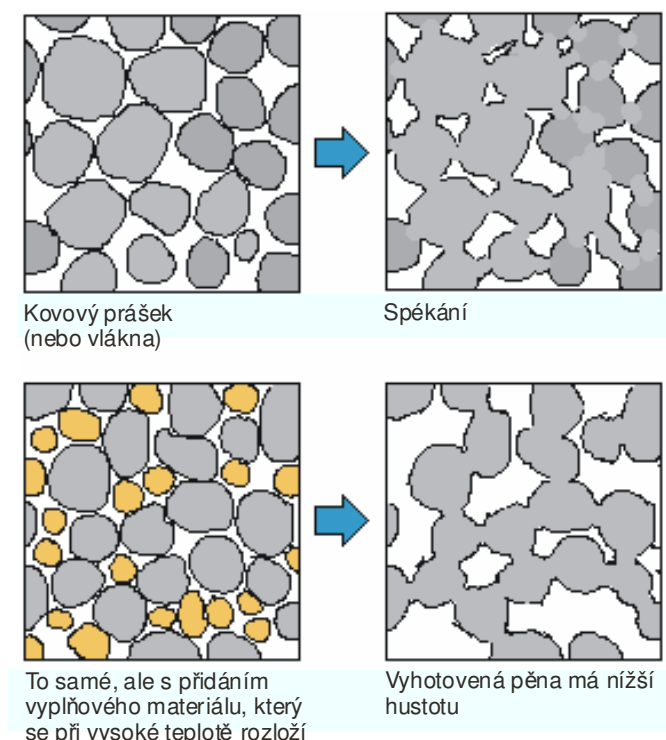
Jednou z předností použití výplňového materiálu je možnost řízení rozložení a velikosti pórů granulometrickou volbou prekursorů. Ovšem maximálně dosažitelná pórovitost kovového materiálu je nižší než 80 % [2].

## 2.2 Výroba kovové pěny z tuhé fáze

Kovy s porézní strukturou se mohou vyrábět nejen z taveniny (tekuté fáze), ale také i z kovového prášku, přičemž prášek zůstává během celého výrobního procesu v tuhém stavu. Tahle skutečnost má vliv na strukturu pěny, protože při výrobě pěny z taveniny kovu pod vlivem povrchového napětí vznikají převážně uzavřené póry. Naopak pěny vyrobené spékáním kovových prášků mají strukturu z relativně kulatých částic spojených mezi sebou v místech natavování. V současné době je spékání kovových prášků nebo vláken nejjednodušším způsobem výroby kovové pěny a je hojně používán v práškové metalurgii [2].

### 2.2.1 Spékání kovových prášků a vláken

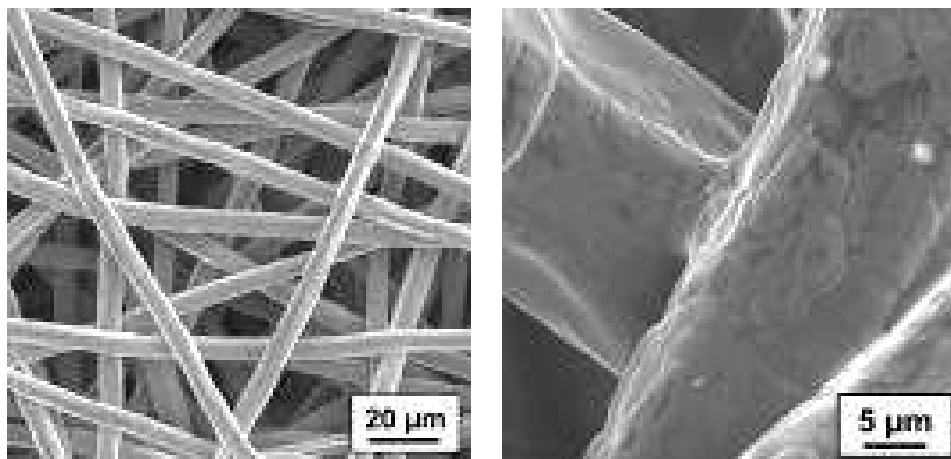
Materiály s otevřenými póry a relativně nízkou pórovitostí (obvykle kolem 30 až 50 %) lze vyrábět částečným spékáním zhuštěných kovových prášků (obr. 2.21) [14]. Pórovitost se dá zvýšit přidáním materiálu, který se během spékání rozloží nebo vypaří [6, 14, 15].



**Obr. 2.21** Nahoře: výroba kovové pěny spékáním kovových vláken nebo prášků

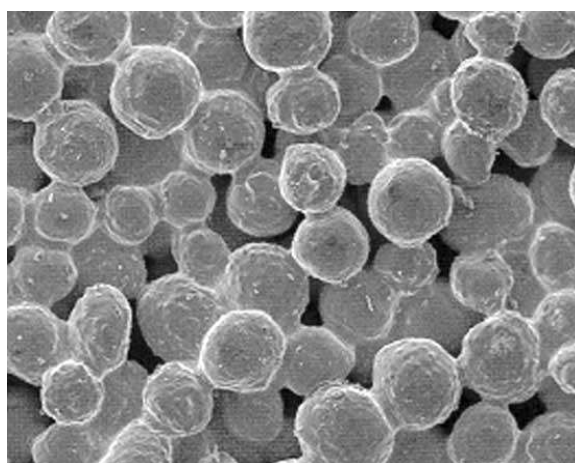
Dole: Výroba pěny s vyšší pórovitostí přidáním vyplňového materiálu [14]

Částečnou nebo úplnou náhradou kovových prášků kovovými vlákny lze dosáhnout pórovitosti 96 až 98 %. Pěny vyrobené z vláken (obr. 2.22) mají podstatně vyšší pevnost a tažnost, než ty vyrobené z kovových prášků, dobře absorbují nárazovou energii a mohou se používat jako filtry s vysokou propustností. Nevýhodou je ovšem vysoká cena kovových vláken [14, 15].



**Obr. 2.22** Struktura pórovitého materiálu vyrobeného spékáním vláken nerezové oceli [6]

Předností technologie spékání kovových prášků nebo vláken je možnost dosažení konečných rozměrů výrobků bez nákladných operací řezání a obrábění [14]. Pro danou technologii se používají různé materiály včetně titanu a vysoce legovaných slitin, ale nejběžnějšími materiály pro komerční použití jsou bronz (obr. 2.23) a nerezová ocel. Výroba porézního hliníkového materiálu pomocí této technologie je velice obtížná vzhledem k vytvoření filmu oxidu hlinitého na povrchu, který brání spékání částic [2].

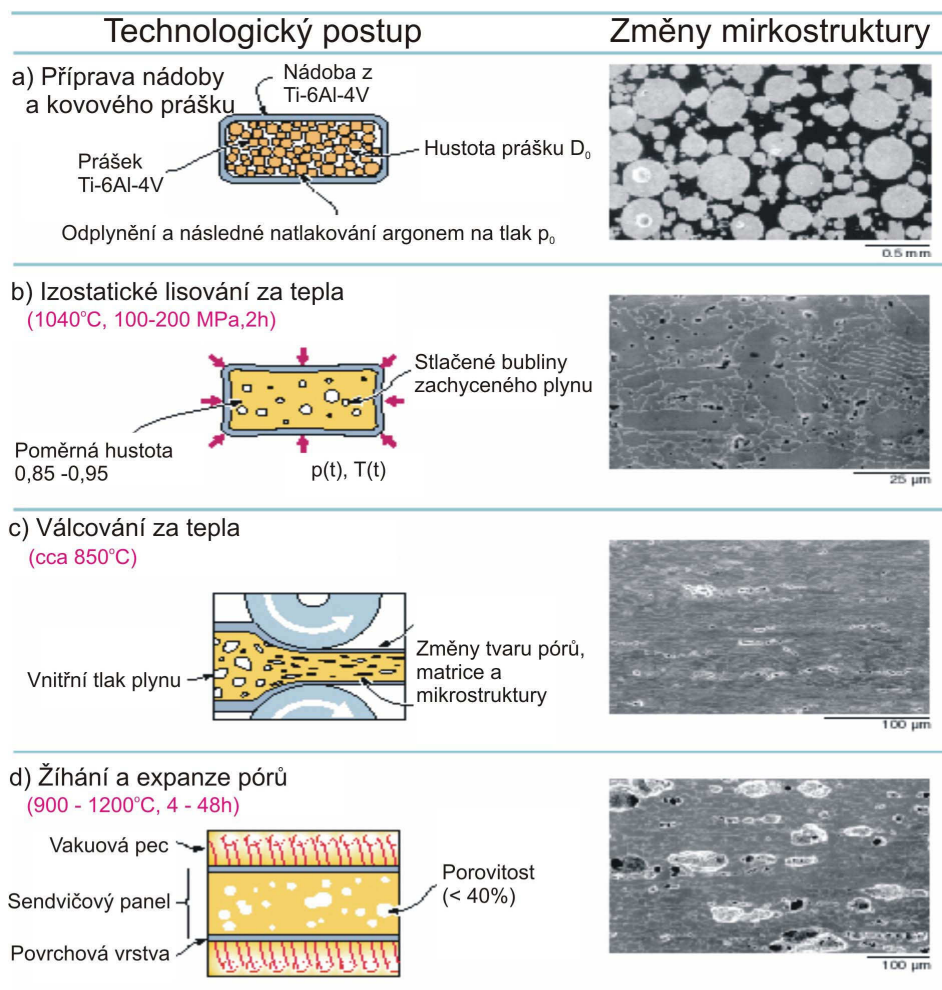


**Obr. 2.23** Pórovitý bronz vyrobený spékáním částic o průměru 100 µm [2]



## 2.2.2 Zachycování plynu v jádře

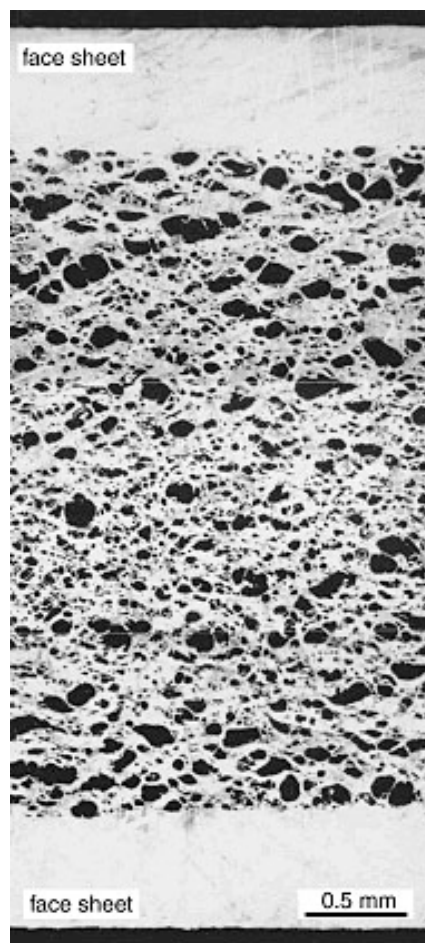
Proces výroby sendvičových konstrukcí s lehčeným jádrem, v zahraniční literatuře označovaný jako Low Density Core Process (LDC), je schematicky znázorněn na obr. 2.24 [15, 28].



**Obr. 2.24** Schéma LDC procesu [28]

Nádoba ze slitiny  $TiAl_6V_4$  se naplní práškem o stejném chemickém složení a nahřeje se na 300 °C. Nádoba se odplyní a vytvoří se v ní vakuum (cca  $< 10^{-2}$  Pa), poté se natlakuje argonem na 0,3 až 0,5 MPa. Následuje hermetické uzavírání nádoby a izostatické lisování za tepla tlakem  $> 100$  MPa po dobu asi 6 h při teplotě 1100 °C. Prášek se zhustí natolik, že pórovitost dosahuje pouhých 2 % a póry jsou zaplněny stlačeným argonem. Poté se provádí tváření za tepla a žíhání při teplotě  $0,6 T_L$  po dobu 6 až 24 hodin. Během žíhání plynové póry pomalu expandují a snižuje se vnitřní napětí, dokud se nedosáhne rovnováhy mezi tlakem plynu a pevností materiálu při dané teplotě. Vznikají tak sendvičové konstrukce s pórovitými

jádry (pórovitost se pohybuje mezi 20 a 40 %, poloměr pórů od 10 do 100  $\mu\text{m}$ ) [2, 15], jejichž struktura je zachycena na obr. 2.25.



**Obr. 2.25** Sendvičová konstrukce  $\text{TiAl}_6\text{V}_4$  s pórovitým jádrem vyrobená LDC procesem [2, 15]

### 2.2.3 Zpěnění suspenze

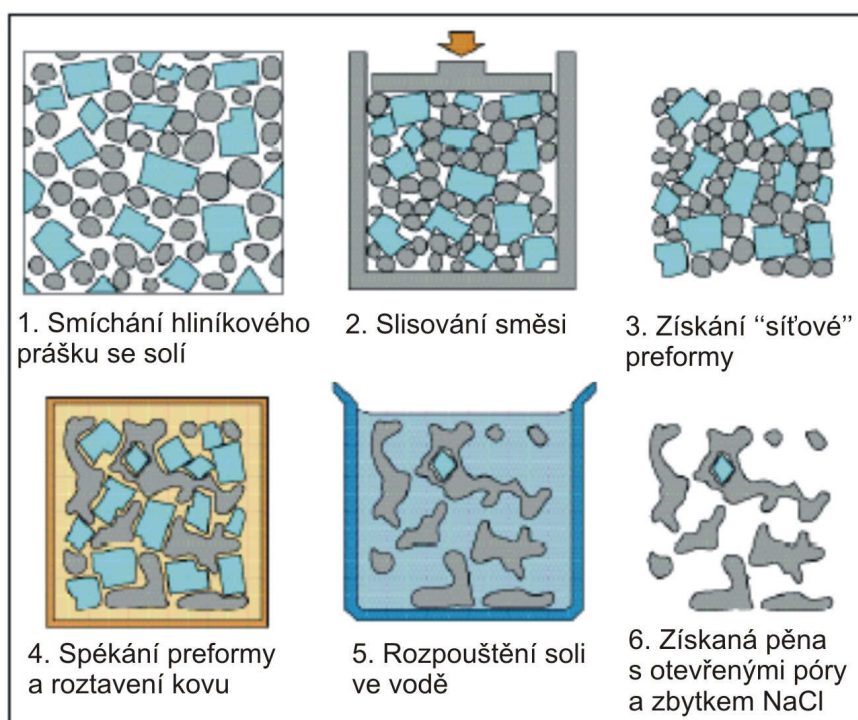
Kovové pěny se mohou vyrábět ze suspenze z kovového prášku smíchaného se zpěňovací přísadou. Rozmíchaná suspenze se nalije do dutiny formy a za zvýšených teplot se suší. Viskozita suspenze stoupá, a v důsledku uvolňování plynu začíná se suspenze zpěňovat. Jestli suspenze je dobře stabilizována, vzpěňená hmota se může kompletně vysušit a vznikne tím kovová pěna.

Takové pěny se vyrábějí z práškového hliníku s použitím zpěňovadla – kyseliny ortofosforečné s přídavkem hydroxidu hlinitého nebo kyseliny chlorovodíkové. Danou metodou se dá dosáhnout hustoty do 7 %, ale nevýhodou je malá pevnost materiálu a náchylnost ke vzniku trhlin [2, 29, 30].

## 2.2.4 Použití výplňového materiálu

Pórovité kovové materiály můžeme získat použitím výplňového materiálu a kovového prášku [2]. Jako výplňový materiál se používá sůl, polymerové nebo keramické částice, duté kuličky nebo dokonce i kov. Výplňový materiál vytváří propojené póry a je odstranitelný vyžiháním, nebo loužením [2, 14].

Na obr. 2.26 je schematicky znázorněn proces výroby kovové pěny s použitím prekursoru rozpustného ve vodě. Hliníkový prášek se smíchá se solí (NaCl), zhustí se a spéká se za teploty těsně nad teplotou tání hliníku. Následným rozpouštěním soli ve vodě se získá struktura s otevřenými póry. Rozměr póru se řídí granulometrickou volbou NaCl a pohybuje se v rozmezích 300 až 1000  $\mu\text{m}$  [14].

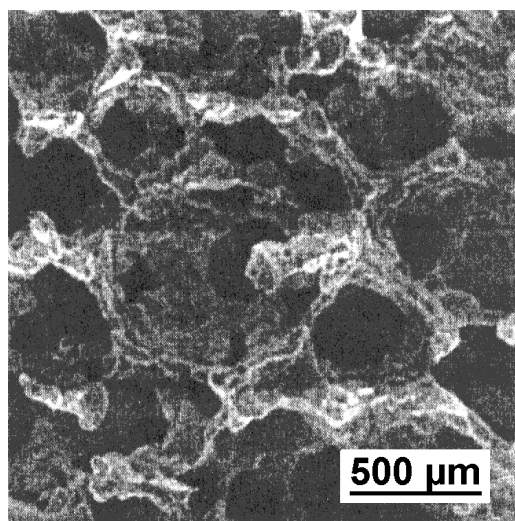


**Obr. 2.26** Schéma výrobního postupu s použitím Al prášku a NaCl [6]

Protože je nutno zajistit propojenou kovovou strukturu, při použití dané technologie se dá dosáhnout maximální pórovitosti 85 %. Minimální pórovitost je 50 % a je podmíněna tím, aby v konečné struktuře nezůstal zbytek NaCl, což by mohlo vest ke korozi hliníkového materiálu [14].

Danou technologii se vyrábějí vysoce kvalitní kovové pěny s otevřenými póry (obr. 2.27) s reprodukovatelnými vlastnostmi. Ovšem metoda není moc rozšířena kvůli nutnosti provádět infiltraci pod tlakem a vysokým nákladům na jemný hliníkový prášek.

Navíc rozpouštění NaCl je časově náročná etapa, obzvlášť u velkých kusů, kde složitost pěnové struktury vyžaduje dlouhé časy na rozpouštění soli [6, 14]. Další způsoby výroby, zejména titanové pěny, s použitím jiných výplňových materiálů jsou popsány v literatuře [2].

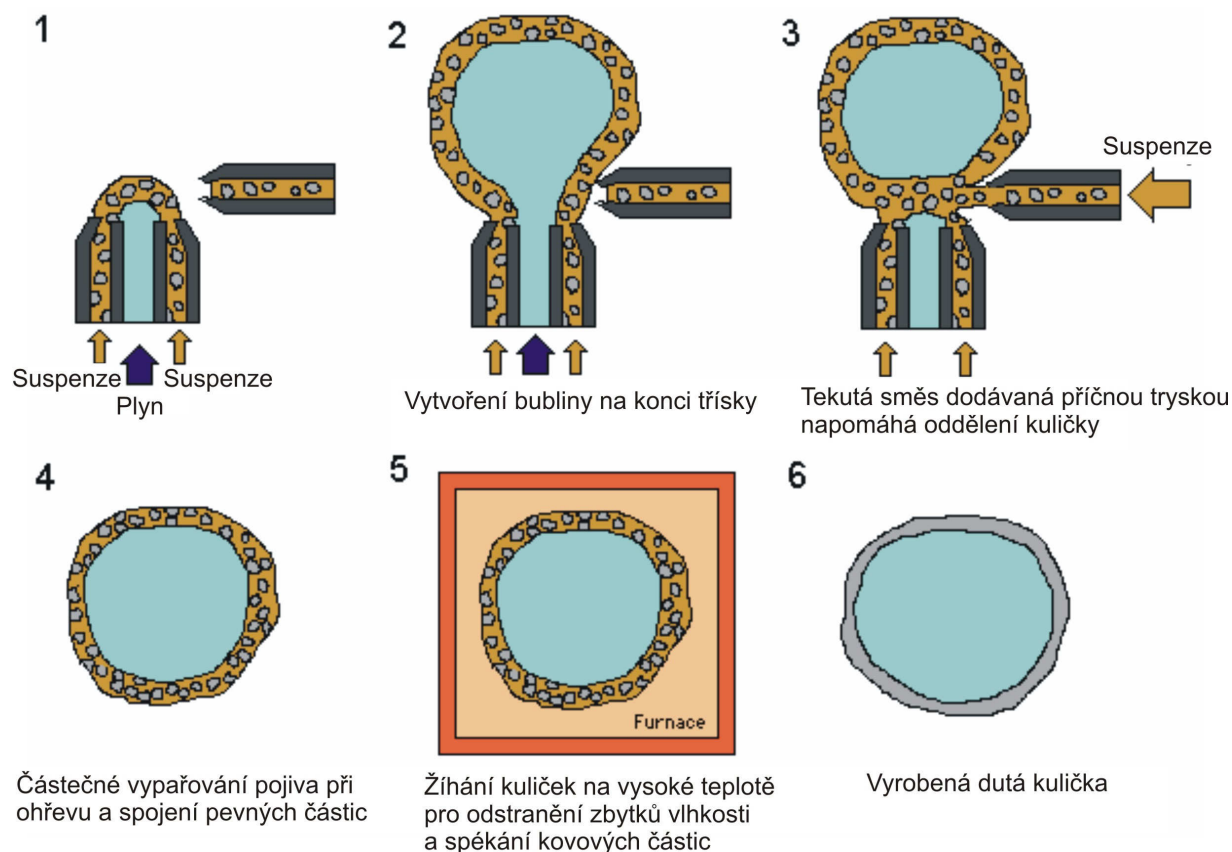


***Obr. 2.27** Pěna vyrobená technologií práškové metalurgie s použitím rozpustného výplňového materiálu [14]*

### **2.2.5 Spékání dutých kovových kuliček**

V dané metodě, na rozdíl od způsobu popsaného v kapitole 2.2.1, se spékají ne kovové prášky, ale duté kovové kuličky (např. z mědi, niklu, oceli nebo titanu) [2] a dá se tím dosáhnout daleko nižší hustoty pěny [14]. Existuje několik metod výroby dutých kuliček [2, 30].

Jedna z metod používá zařízení se souosou dvojitou tryskou, které je znázorněno na obr. 2.28 (1). Plyn je foukán vnitřní tryskou a řídká suspenze, skládající se z pevných částic (kovových, keramických nebo jejich směsí), pojiva, stabilizátoru, dispergačního prostředku a prchavé kapaliny se podává vnější tryskou. Vnitřní tryška pulzuje a podává plyn. Příčnou tryskou je periodicky stříkána tekutá směs, aby napomáhala vytváření (2) a oddělení (3) kuliček. Prchavá tekutá fáze se z části vypařuje a pevné částice se spojují a vytváří relativně stabilní kuličky (4). Kuličky se zatím žihají na vysoké teplotě (5), aby se odstranily zbytky vlhkosti. Hotové kovové kuličky mají přibližně stejný průměr a tloušťku stěn (6) [14].

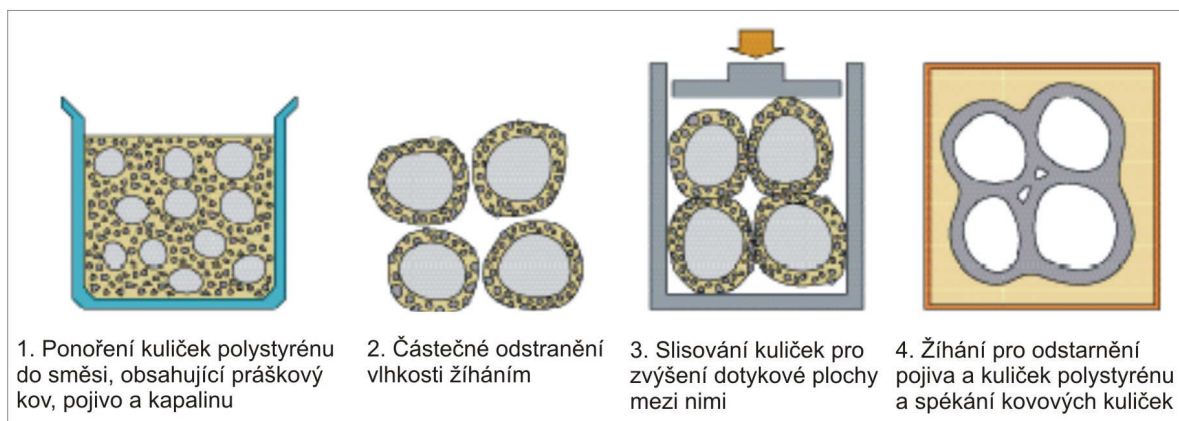


**Obr. 2.28** Postup výroby dutých kovových kuliček ze suspenze obsahující kovový prášek [14]

Poloměr kuliček se pohybuje od 500 do 6000  $\mu\text{m}$ , a tloušťka stěn od 5 do 400  $\mu\text{m}$ . Ačkoliv kuličky mají přibližně stejný poloměr, mohou být pravidelně uspořádány. Pro spojení kuliček se dá použít podobné suspenze jako pro jejich vytvoření [14].

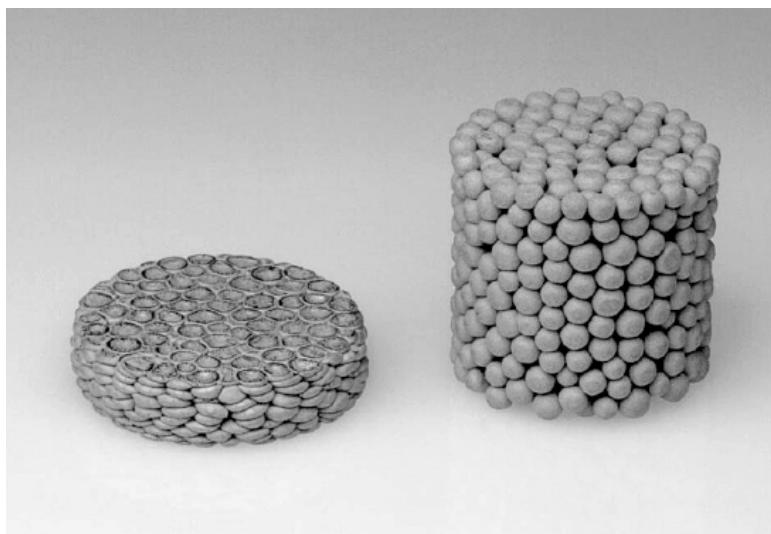
Při použití oxidického kovového prášku během spékání dojde k přímé redukci oxidu na povrchu kuliček a ty se spojí v místech dotyku. Takhle se vyrábějí například ocelové pěny o hustotě 80 až 87 % [14].

Duté kuličky se dají vyrábět méně nákladnou metodou při použití polystyrénových kuliček (obr. 2.29). Kuličky polystyrénu se ponoří do směsi, obsahující práškový kov, pojivo a kapalinu (obr. 2.29 – 1). Žíháním se odstraní tekutá fáze (2) a slisováním se zvýší dotyková plocha mezi kuličkami (3). Následuje vypalování, při kterém se odstraní pojivo a polystyrén, a kovové kuličky se spečou mezi sebou (4) [6].



**Obr. 2.29** Výroba kovové pěny s použitím polystyrénových kuliček [6]

Obvyklý průměr kuliček se pohybuje v rozmezí 0,8 až 8 mm, tloušťka stěn od 10 do 100  $\mu\text{m}$ . Z kuliček se vyrábějí pórovité materiály s otevřenou nebo uzavřenou pórovitostí a s pravidelným nebo nepravidelným uspořádáním pórů [2]. Strukturu s otevřenou pórovitostí lze získat spékáním dutých kovových kuliček a vytvářením krčků v místech kontaktu mezi kuličkami. Příklad takové struktury je znázorněn na obr. 2.30.



**Obr. 2.30** Struktura s otevřenou pórovitostí z dutých kuliček z nerezové oceli (před a po jednoosé deformaci), průměr kuliček cca 20 mm [2]

Uzavřená struktura se získá vyplněním meziprostoru mezi kuličkami kovovým práškem s následujícím spékáním. Sendvičové struktury (obr. 2.31) se vyrábějí spékáním dutých kovových kuliček mezi dvěma plechy, přičemž kuličky se spojí nejen mezi sebou ale také s plechy [2].



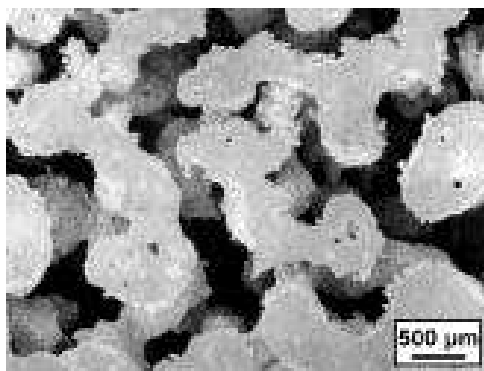


**Obr. 2.31** Sendvičová struktura s lehčným jádrem [30]

Výhodou struktury vytvořené z dutých kovových kuliček je to, že rozložení velikostí pórů v objemu materiálu není náhodné (jako v případě kovových pěn popsanych v kapitolách 2.1.1-2.1.3), ale může být řízeno vhodnou volbou kuliček. Proto i mechanické a fyzikální vlastnosti materiálů z dutých kuliček jsou více předvídatelné, než u „pravé pěny“ s náhodnou velikostí pórů [2].

## 2.2.6 Reakční spékání

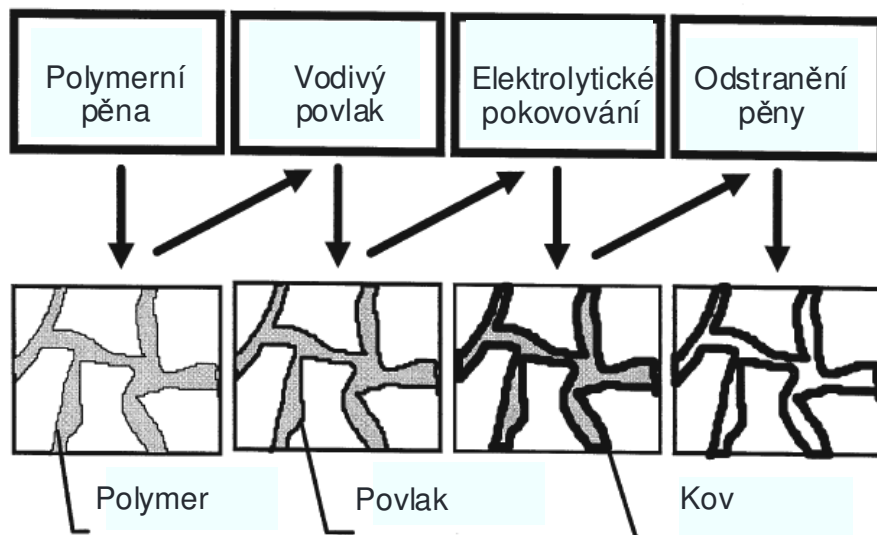
Pórovité kovové materiály se vyrábějí reakčním spékáním. Daná technologie spočívá ve smíchání dvou práškových kovů, které při exotermické reakci vytvoří intermetalickou sloučeninu a v následném slisování a zapálení směsi. Po reakci pórovitost vzorku vzrůstá obecně o 10 až 25 % a částice se pevně spojují do pěny s otevřenými póry [6]. Danou technologií se vyrábějí kovové pěny ze směsi Fe-Al, Ni-Ti, Ti-Al, Ti-Si (obr. 2.32) [2, 6]. Daný postup je rychlý a energeticky efektivní, dosahuje se velikostí pórů kovové pěny do 1 mm. Ovšem seznam používaných materiálů je značně omezen [6].



**Obr. 2.32** Pórovitá struktura vyrobená reakčním spékáním směsi Ti-Ni [6]

## 2.3 Elektrolytické pokovování

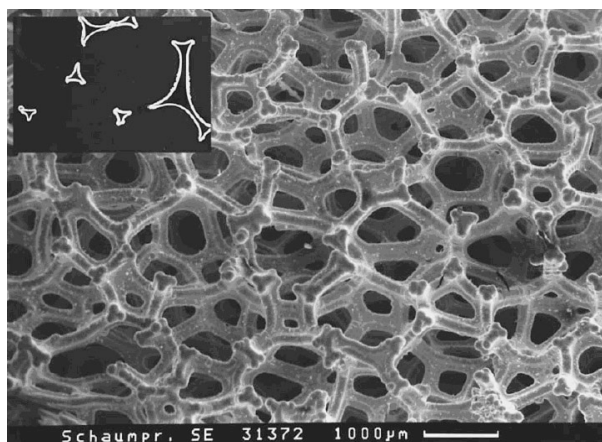
Daná metoda využívá elektrického pokovování polymerní pěny s otevřenými póry, která se posléze odstraní (obr. 2.33).



**Obr. 2.33** Technologie elektrolytického pokovování [2]

Aby bylo možno elektrolytické pokovování provést, polymerní pěna musí být elektricky vodivá. To se dosáhne ponořením polymerní pěny do elektricky vodivého roztoku na bázi grafitu nebo sazí nebo dalšími způsoby. Potom následuje elektrolytické pokovování a odstranění polymerní pěny vyžiháním [2].

Pro danou metodu se převážně používá Ni a slitin Ni-Cr, ale dají se vyrábět také i měděné [2] a hliníkové [6] pěny. Příklad niklové pěny je uveden na obr. 2.34. Pěny se vyrábějí pod obchodním názvem Retimet (Dunlop, Velká Britanie), Celmet (Sumitomo Electric, Japonsko) a Recemat (SEAC, Nizozemsko) [2, 29].

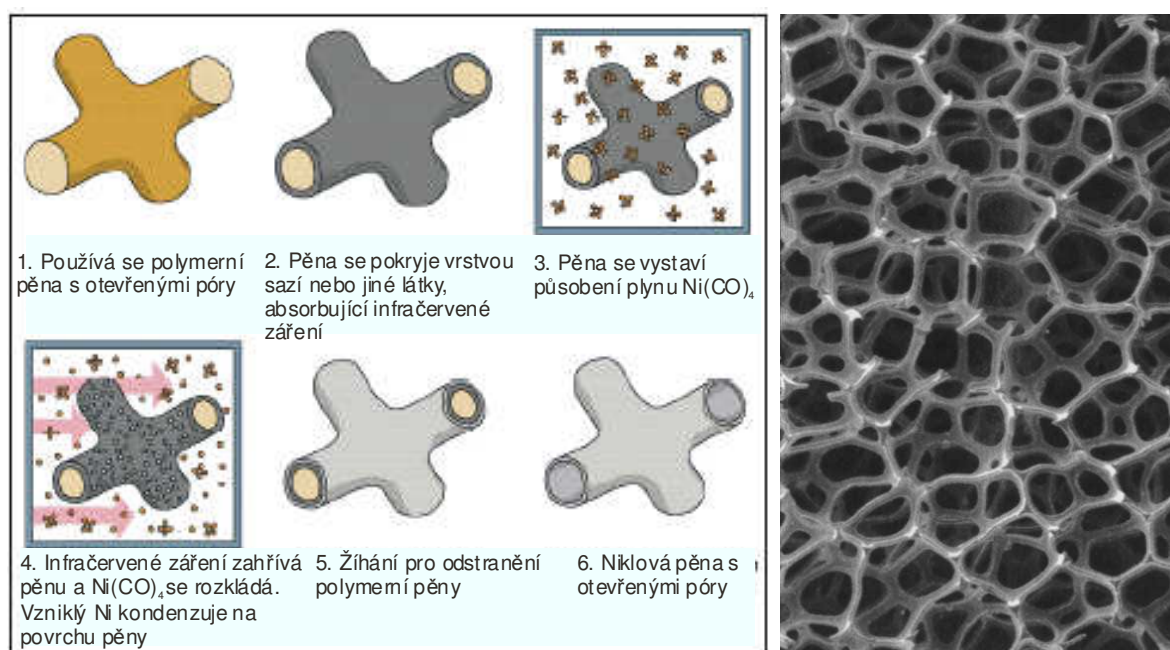


**Obr. 2.34** Niklová pěna vyrobená metodou elektrolytického pokovování [2]



## 2.4 Vakuové napařování

Kovové pěny se mohou vyrábět z kovové páry nebo plynové sloučeniny kovu. Ve vakuové komoře vznikají kovové výpary, které kondenzují na studeném prekursoru. Jako plynná látka se používá tetrakarbonyl niklu, který vzniká reakcí  $\text{Ni} + 4\text{CO} \rightarrow \text{Ni}(\text{CO})_4$ . Jako prekursor slouží pevná pórovitá struktura, např. polyuretanová pěna nebo polymerní materiál s mřížovitou strukturou. Pěna se pokryje látkou absorbující infračervené záření, například vrstvou sazí [6]. Prekursor se zahřeje sálavým teplem na teplotu nad  $120^\circ\text{C}$ , což odpovídá teplotě rozkladu tetrakarbonylu niklu, který se rozkládá na oxid uhelnatý a nikl. Kondenzující kov pokrývá povrch polymerního prekursoru a vytváří vrstvu o určité tloušťce, závislou na měrné hmotnosti páry a době expozice [2]. Poté se vyžiháním nebo chemickým zpracováním odstraní polymerní pěna a vzniklý materiál má podobnou strukturu, jako pěna, vyráběná elektrolytickým pokovováním, popsaná v předchozí kapitole. Schéma výrobního procesu a struktura pěny jsou znázorněny na obr. 2.35. Podrobnější informace o procesu vakuového napařování lze naléznout v literatuře [31].



**Obr. 2.35** Vlevo: Postup výroby niklové pěny s otevřenými póry [6]

Vpravo: Struktura niklové pěny [2]

### 3. Praktické řešení

Praktická část diplomové práce je věnována ověřování vybraných výrobních postupů, popsaných v teoretické části. Je zaměřena především na výrobu pórovitého hliníkového materiálu slévárenskou cestou. Hledá jednoduchou a dostupnou technologii, která nevyžaduje použití drahých materiálů a zařízení a byla by dostupná v každé slévárně. Proto se volí technologie gravitačního lití do trvalých a do jednorázových forem. Jako materiál pro vyhotovení pórovitých odlitků se používá slévárenský silumin. Dále se vyhodnocují vlastnosti vyhotovených odlitků, provádí se tlaková zkouška pro ověření schopností materiálů k pohlcování nárazové energie.

#### 3.1 Ověření vybraných postupů

Ověřují se následující technologie výroby pórovitých kovových materiálů:

- vzpěnění taveniny probubláváním plynem,
- lití s použitím odpařitelného modelu,
- zalití výplňového materiálu, který po odstranění zanechá póry ve struktuře materiálu.

Také se pokouší o vyhotovení odlitku s pórovitou vnitřní strukturou a pevnou povrchovou vrstvou.

##### 3.1.1 Probublávání taveniny plynem

Daný experiment byl založen na metodě popsané v kapitole 2.1.1.2, jen s tím rozdílem, že do taveniny nebylo přidáno žádné zahušťovadlo. Cílem tohoto pokusu bylo vyzkoušet, zda-li při probublávání taveniny kovu inertním plynem dojde k zachycení plynových bublin v objemu odlitku a ke snížení jeho hustoty.

Odlévaly se dva vzorky ze slitiny AlSi. První vzorek se odléval při teplotě 750°C do kovové formy, aby došlo k rychlému ztuhnutí odlitku. Poté se zbytek taveniny probublal argonem a ihned byl odlit druhý vzorek. Proces je znázorněn na obrázku 3.1.



**Obr. 3.1** Vlevo: Probušování taveniny argonem. Vpravo: Odlévání druhého vzorku

U obou vzorků byly změřeny hmotnost i objem a stanovena hustota. Hustota vzorku bez argonu byla menší, než vzorku odlitého ze slitiny profukované argonem. Daná skutečnost nasvědčuje tomu, že k zachycení bublin argonu ve vzorku nedošlo, proběhlo ale odplynění taveniny a její rafinace. Pohled na vzorky uvádí obrázek 3.2, a naměřené hodnoty jsou zahrnuté v tabulce č. 3.1.

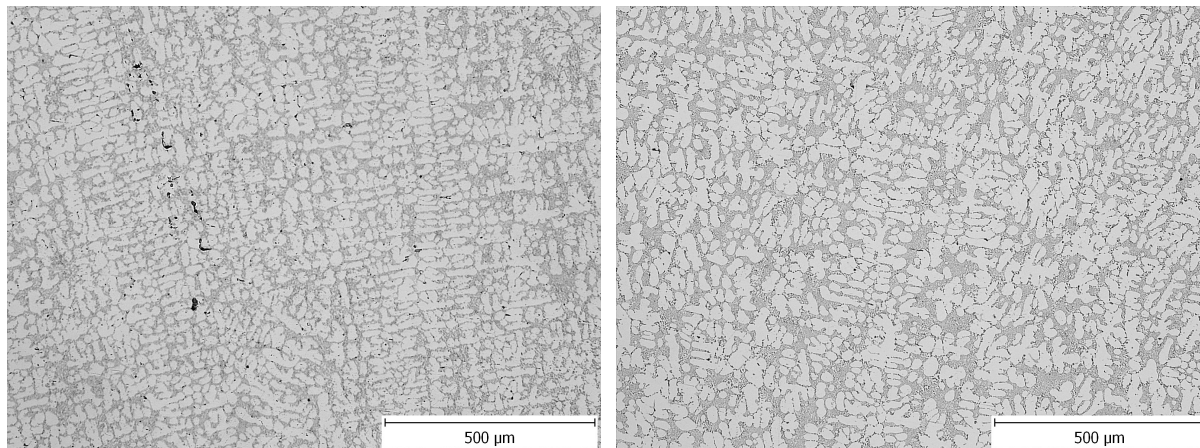


**Obr. 3.2** Odlité vzorky (vlevo: bez argonu, vpravo: probušený argonem)

**Tabulka 3.1** Vlastnosti odlitých vzorků

Vzorek	Bez Argonu	S Argonem
Hmotnost, g	304,2	310,8
Objem, cm <sup>3</sup>	114	116
Hustota, g/cm <sup>3</sup>	2,668	2,679

Tuto skutečnost potvrzují i metalografické výbrusy (obr. 3.3), na kterých nebyl výskyt bublin argonu v odlitku prokázán.



**Obr. 3.3** Metalografický výbrus. Vlevo: Vzorek č. 1.

Vpravo: Vzorek č. 2 (proublávaný argonem)

Daná metoda se dále nezkoušela, protože beze zvýšení viskozity taveniny k zachycení bublin plynu nedošlo a vnášení zahušťovadla do objemu taveniny by mělo nepříznivý vliv na recyklovatelnost materiálu.

### 3.1.2 Použití neorganického výplňového materiálu

Při daném pokusu se provádělo ověření metody výroby pórovitých kovových odlitků zalitím výplňového materiálu, popsané v kapitole 2.1.4.3. Jako výplňový materiál byly použity granule keramzitu, které se nasypaly do dutiny pískové formy. Hlavním cílem bylo zjistit, jak se výplňový materiál bude chovat, jakým způsobem jeho granulometrie ovlivní zabíhavost kovu a jaký vliv na zabíhavost bude mít konstrukce vtokové soustavy.

**První pokus.** Na odlitcích jednoduchého tvaru se zkoušel způsob odlévání. V prvním případě se odlitek zaformoval do spodního formovacího rámu, vtok byl zaústěn shora. Celá dutina formy byla vyplněna keramzitem s velikostí granul 3 až 4 mm. Následovalo klidné plnění tekutým kovem. Výsledkem bylo nezaběhnutí větší části odlitku (obr. 3.4 nahoře).

V druhém případě se odlitek zaformoval do horní poloviny formy s dolním zaústěním vtoku a další podmínky formování a lití zůstaly stejné. Zaběhl téměř celý odlitek (obr. 3.4 dole). Proto při dalších pokusech se používalo spodní zaústění vtoku.





**Obr. 3.4** Nahoře: Odlitek se zaústěním vtoku shora (nezaběhnutí poloviny odlitku).

Dole: Odlitek s dolním zaústěním vtoku (zaběhl skoro celý)

**Druhý pokus.** Formování odlitku se provádělo do horního formovacího rámu s zaústěním vtoku ze spodu. Byly použity dva zářezy. Dutina formy byla do poloviny zaplněna keramzitem o velikosti frakcí 8 až 16 mm. Odlitek zaběhl celý (obr. 3.5), ale při odlévání došlo k explozivnímu zvednutí hladiny kovu. Dodatečně naměřená vlhkost keramzitu dosahovala 1,2 %, proto bylo rozhodnuto při dalším formování použít vyžíhaný keramzit.



**Obr. 3.5** Odlitek rozřezaný na tři části

**Třetí pokus.** Keramzit o frakcích 8 až 16 mm se před zakládáním do formy žíhal na teplotě 150 - 200°C po dobu 2 hodin. Vlhkost při 110°C dosahovala 0,28 %. Do formy se zakládal vlašný, další podmínky formování a lití byly obdobné, jako v předchozím případě. Výsledkem byl celý zaběhlý odlitek (obr. 3.6).



**Obr. 3.6** Kompletně zaběhlý odlitek

Jako výplňový materiál pro další odlitek se použil keramzit o velikosti granul 3 až 4 mm, žíhaný na teplotě 150°C po dobu 1 hodiny. Naměřená vlhkost při 110°C činila 0,18 %. Dutina formy byla zaplněná víc jak na polovinu horkým keramzitem. Zakládáním horkého výplňového materiálu se předpokládalo zvýšení zabíhavosti, ovšem odlitek téměř nezaběhl. Výsledek je znázorněn na obr. 3.7.



**Obr. 3.7** Nezaběhlý odlitek.

Podstatný vliv na zabíhavost měla velikost granul výplňového materiálu. Při použití keramzitu s zrnitostí 3 až 4 mm ve dvou případech ze třech došlo k nezaběhnutí větší části odlitku. Při použití výplňového materiálu o frakcích 8 až 16 mm oba zkušební odlitky kompletně zaběhly. Vliv teploty výplňového materiálu na zabíhavost se neprokázal. Značný rozdíl ve způsobu zaústění vtokové soustavy se také neprojevil.

### 3.1.3 Použití organického výplňového materiálu

Další pokusy se prováděly s použitím organického výplňového materiálu. Formování se provádělo do jednotné bentonitové směsi, dutina forem se na  $\frac{3}{4}$  zaplnila organickým materiálem. První odlitek ve tvaru hranolu a druhý odlitek ve tvaru polokoule se odlévaly přes nálipek. Třetí odlitek ve tvaru polokoule se plnil dvěma zářezy, vtok byl zaústěn ze spodu. Klidné lití se provádělo za teploty 750°C. Surové odlitky jsou znázorněny na obrázku 3.8.



*Obr. 3.8 Surové odlitky*

Výplňový materiál se poté odstranil vyžháním na teplotě 450°C a odlitky se rozřezaly. Řez odlitky je zachycen na obrázku 3.9. Pórovitost prvního vzorku dosahovala 54 % a průměr póru 7 mm; pórovitost druhého vzorku se rovnala 62 % při velikosti pórů 13 mm. Pórovitost třetího vzorku se nestanovovala z důvodu nezaběhnutí větší části odlitku. U všech třech odlitků byly póry nerovnoměrně rozloženy v objemu materiálu.



*Obr. 3.9 Rozřezané odlitky*

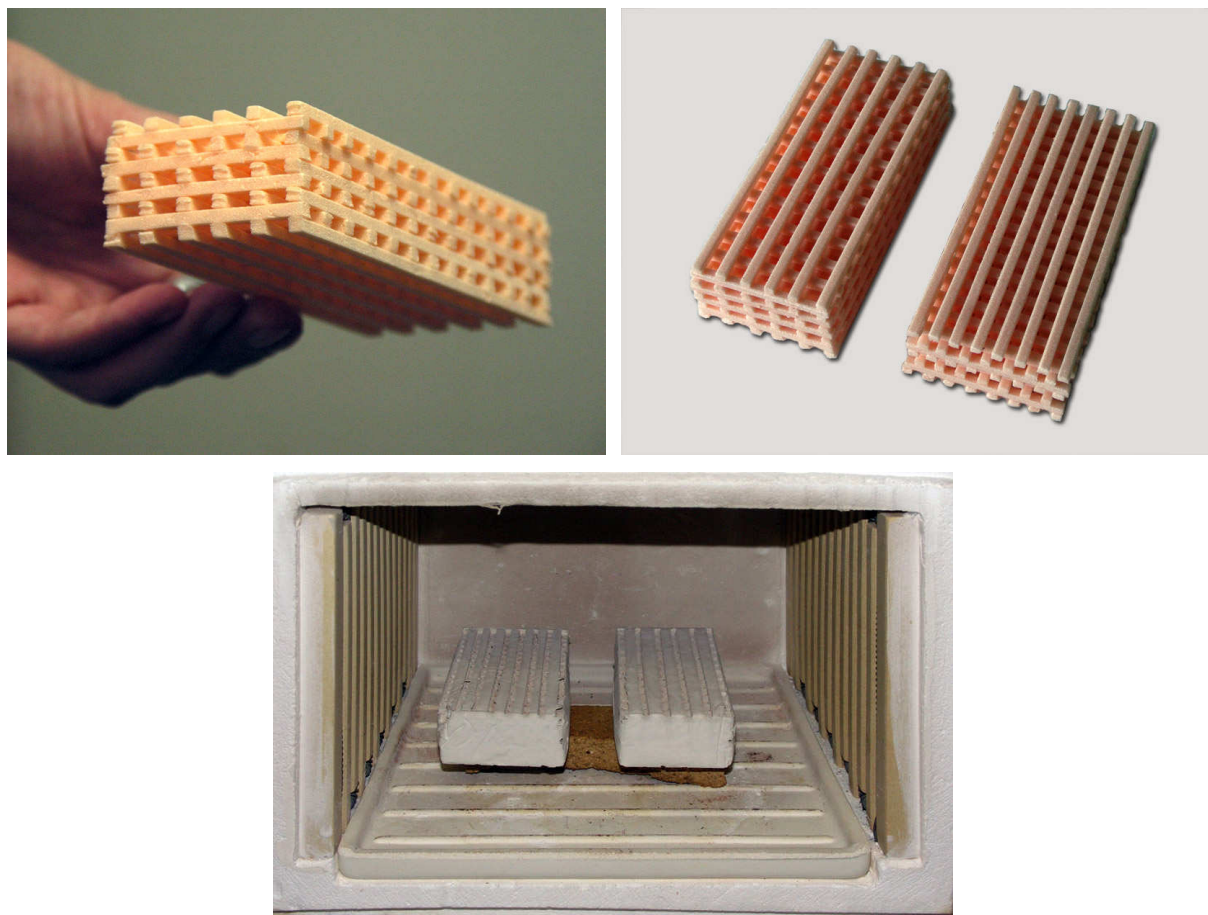
### 3.1.4 Použití odpařitelného modelu

Hlavní nevýhodou metody s použitím výplňového materiálů je nepravidelnost struktury a náhodné rozložení pórů v objemu odlitku a proto nemožnost dosažení reprodukovatelných výsledků. Proto další pokusy byly zaměřeny na vyhotovení pórovitého



materiálu s pravidelnou strukturou. Získaná struktura odpovídala mřížovitém materiálům (LBMs), popsaným v kapitole 2.1.4.2.

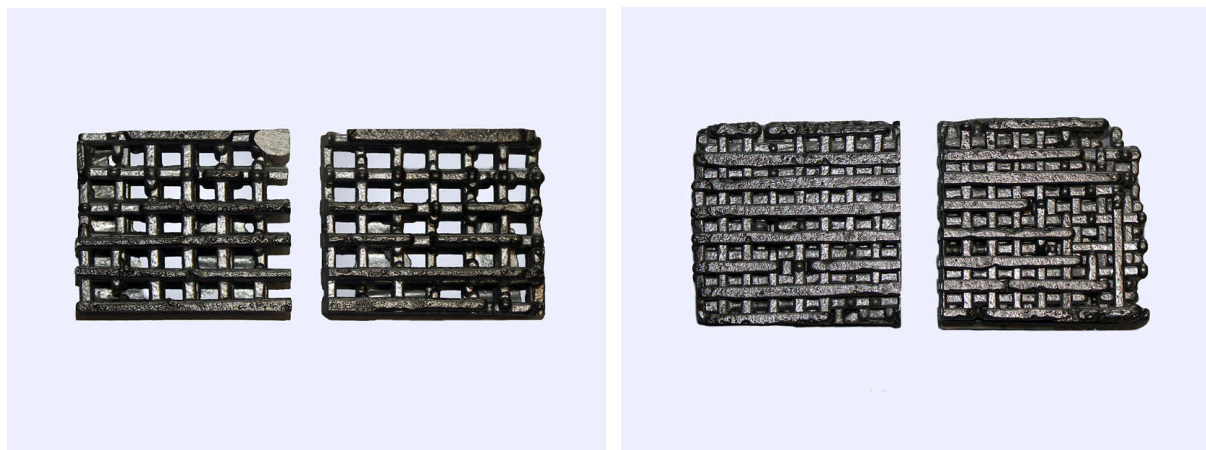
Z polystyrénu lepením byly vyhotoveny dva hranoly s mřížovou strukturou (první model měl otvory skrz, druhý – přesazené otvory). Polystyrénové modely jsou znázorněny na obrázku 3.10.



**Obr. 3.10** Nahoře: Model mřížek z polystyrénu. Dole: Vyžítání polystyrénu ze sádrové formy

Vyhotovené modely se zalily sádrou (100 hm.d. sádry, 35 hm.d. vody) a tepelným zpracováním se odstranil polystyrén (obr. 3.10 vpravo). Vzniklý sádrový model se zaformoval do jednotné bentonitové směsi a následovalo odlévání slitiny AlSi při lící teplotě 750°C.

Odstranění sádry z odlitků bylo obtížné a provádělo se několikrát. Odlitky se sádrou se zahřály na 400°C a ponořily se do studené vody. Danou operaci se ale veškerá sádra neodstranila. Dále se provádělo čištění odlitků v ultrazvukové lázni, a zbytky sádry se následně odstranily mechanickým způsobem. Odstranily se vtoky a zářezy na odlitcích a odlitky se rozřezaly na dvě poloviny (obr. 3.11). Pórovitost vyhotovených odlitků dosahovala 68 a 60% . Na odlitcích se dále prováděla tlaková zkouška, která je popsána v kapitole 3.2.1.



**Obr. 3.11** Mřížové odlitky

Vzhledem k obtížnému odstranění sádky z odlitků se navrhnul postup, při kterém se měla použít ztekucená formovací směs, která měla vyplnit prostory ve mřížce a posloužit jako jádro při následném odlévání.

Následovaly zkoušky formovacích směsí, které měly za cíl ověřit vhodnost formovací směsi pro výrobu formy při lití na odpařitelný model. Na normoválečcích se měřila pevnost formovací směsi ve stříhu (okamžitá pevnost a pevnost po tepelné expozici – žíhání na 450°C po dobu 2 hodin, což odpovídá podmínkám pro vyžíhání polystyrénového modelu). Složení formovací směsi bylo následující:

1. směs: 100 hm.d. – křemenný písek (ŠH 35), 3 hm.d. – pryskyřice Novanol<sup>1</sup> 180;
2. směs: 100 hm.d. – křemenný písek (ŠH 35), 3 hm.d. – pryskyřice Novanol 145.

Doba vytvrzování směsi CO<sub>2</sub> byla 30 s. Naměřené hodnoty pevnosti ve stříhu uvádí tabulka 3.2.

**Tabulka 3.2** Pevnost formovací směsi ve stříhu

	1. směs - pevnost ve stříhu, [MPa]		2. směs - pevnost ve stříhu, [MPa]	
	Primární	Po žíhání	Primární	Po žíhání
1	0,552	0,075	0,610	0,19
2	0,520	- <sup>2</sup>	0,510	0,23
Průměr	0,536	0,075	0,560	0,21

<sup>1</sup> Alkalická fenolová pryskyřice

<sup>2</sup> Při přenosu se váleček rozbil

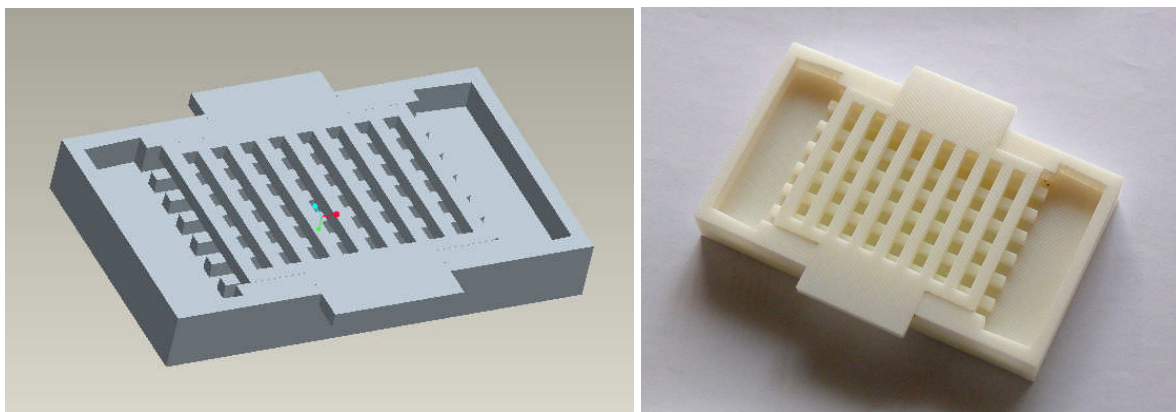
Obě směsi po tepelné expozici vykazovaly značný povrchový otěr a měly nízkou manipulační pevnost. Z toho důvodu nebylo možné použít danou formovací směs pro zaformování odpařitelného polystyrénového modelu. Po vyžhání modelu by směs měla malou pevnost a nevydržela by náraz tekutého kovu při odlévání. Proto se ztekucení směsi neprovádělo.

Metoda výroby odlitků s mřížovou strukturou s použitím odpařitelného modelu umožňuje dosažení reprodukovatelných výsledků, ovšem výroba jednorázového modelu představuje velmi pracnou a časově náročnou etapu. Proto bylo rozhodnuto při dalších pokusech pro vyhotovení pórovitého odlitku použít jádro vyrobené běžnou technologií z formovací směsi.

### **3.1.5 Výroba materiálu s pevnou povrchovou vrstvou**

Pro vyhotovení odlitku s pravidelnou mřížovou strukturou a pevnou povrchovou vrstvou se navrhlo jádro, které by vytvořilo pravidelné dutiny uvnitř odlitku a umožňovalo odlít pevné povrchové vrstvy na odlitku ze čtyř stran. Pro výrobu pískového jádra se musel vyhotovit jaderník. Vzhledem k složitému mřížovému tvaru jádra, musel se navrhnout pětídílný rozebíratelný jaderník, který by umožnil snadné vyjímání jádra.

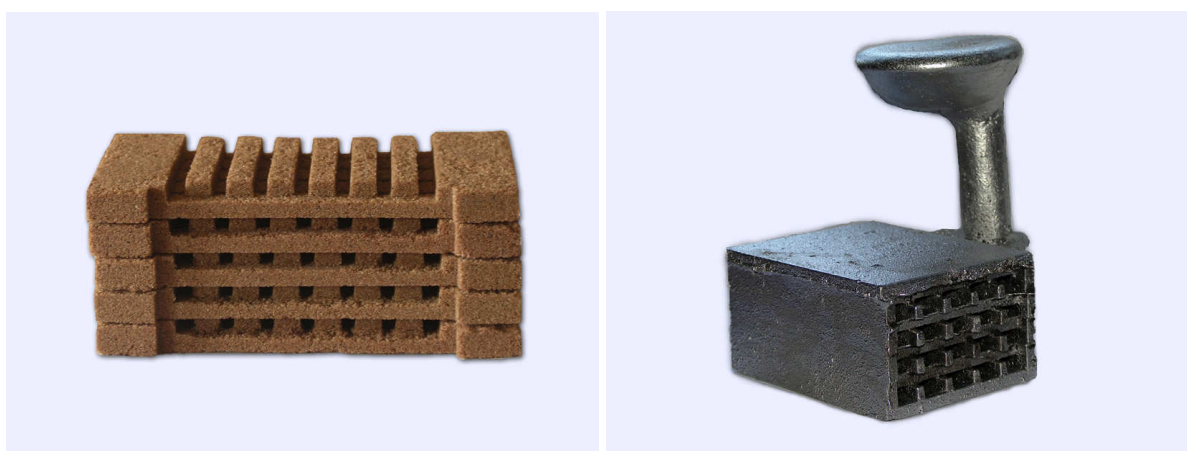
Jaderník byl vymodelován v programu ProEngineer (obr. 3.12) a pro jeho vyhotovení byla zvolena technologie Fused Deposition Modeling, která patří mezi technologie Rapid Prototypingu a 3D tisku, která umožňuje na základě počítačových dat vyrobit fyzický model nebo finální produkt v krátkém čase v porovnání s klasickými technologiemi. Model je vytvářen vrstvou po vrstvě z termoplastu akrylonitril-butadien-styrenu, zkráceně ABS. Tento materiál díky svým vlastnostem (pevnost v tahu 22 MPa, modul pružnosti v tahu 1,627 GPa, tepelná odolnost 96°C) umožňuje využívat modely jako funkční prototypy, modely pro výrobu forem i pro přímou výrobu, tzv. Direct Digital Manufacturing [32].



**Obr. 3.12** Vlevo: 3-D model jaderníku v programu ProEngineer.

Vpravo: Vyhotovený jaderník z ABS plastu

Zhotovený jaderník (obr. 3.12) se použil pro výrobu jader z formovací směsi o následujícím složení: 100 hm.d. křemenného písku (ŠH 35) a 3 hm.d. pryskyřice Novanol 145. Směs se vytvrzovala profukováním CO<sub>2</sub> po dobu cca 15 sekund. Vyhotovená jádra (obr. 3.13) se složila na sebe a vložila se do dutiny formy z jednotné bentonitové směsi. Následovalo gravitační odlévání při lící teplotě 750°C ze slitiny AlSi. Pohled na surový odlitek zachycuje obrázek. 3.13. Hustota vzorku dosahuje 60%.



**Obr. 3.13** Vlevo: Písková jádra. Vpravo: Surový odlitek s mřížovou strukturou a pevnou povrchovou vrstvou

Na odlitku jednoduchého tvaru se ověřilo, že jde jednoduše vyrobit jádro a použít ho pro výrobu odlitků s vnitřní pórovitou strukturou a pevnou povrchovou vrstvou. Pro výrobu tvarově složitých odlitků by bylo možné navrhnout a vyhotovit pomocí systému Rapid Prototyping vhodná složitá jádra. Pro výrobu jádra by se měla používat směs, která má vysokou manipulační pevnost a dobrou rozpadavost po odlití. Proto se navrhuje použití organických pryskyřic jako pojiva pro jádrovou směs.

Pro ověření schopnosti vyhotoveného materiálu pohlcovat nárazovou energii se připravené vzorky podrobily zkoušce tlakem, popsané v kapitole 3.2.1.

### 3.1.6 Lití s použitím jemné polymerní pěny

Zkoušela se technologie lití na odpařitelný model, popsaná v kapitole 2.1.4.1. Jako model se použila polyuretanová pěna, dutiny které byly vyplněny sádkou (100 hm.d sádky, 50 hm.d vody). Sádková forma se žíhala na teplotách 105, 500 a 640°C, před odléváním se forma dodatečně ohřála na 750°C, aby se zlepšily podmínky pro zaběhnutí kovu. Tavení a odlévání se provádělo na zařízení INDUTHERM MC 15, které umožňuje kombinaci vakua a tlaku. Odlévala se slitina AlSi při teplotě 750°C za podtlaku 1 bar. Po ukončení lití se zvýšil tlak na 2 bary, což napomohlo zaplnění dutiny formy kovem.

Pro odstranění zbytků sádky se provádělo žíhání na teplotě 450°C a následné ponoření odlitků do vody. Pohled na hotové odlitky uvádí obrázek 3.14



***Obr. 3.14 Odlitek hliníkové pěny***

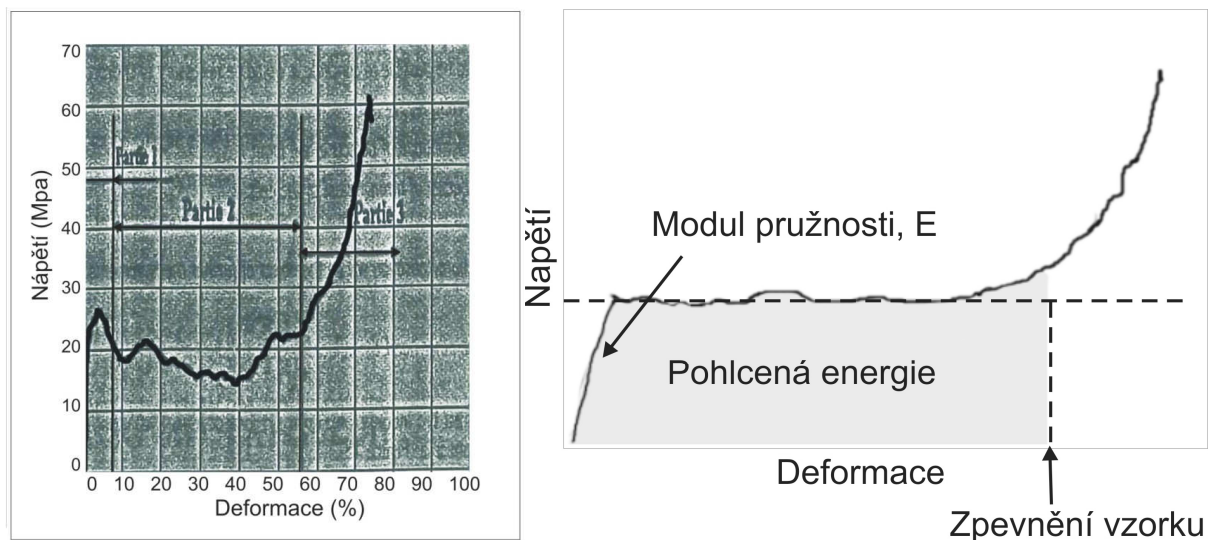
Pórovitost vyhotovených odlitků dosahovala 97 %. Daná technologie umožnila výrobu kovové pěny s velmi jemnou strukturou, která by byla vhodná zejména pro výrobu kovových filtrů.



## 3.2 Hodnocení mechanických vlastností vyrobených materiálů

### 3.2.1 Tlaková zkouška

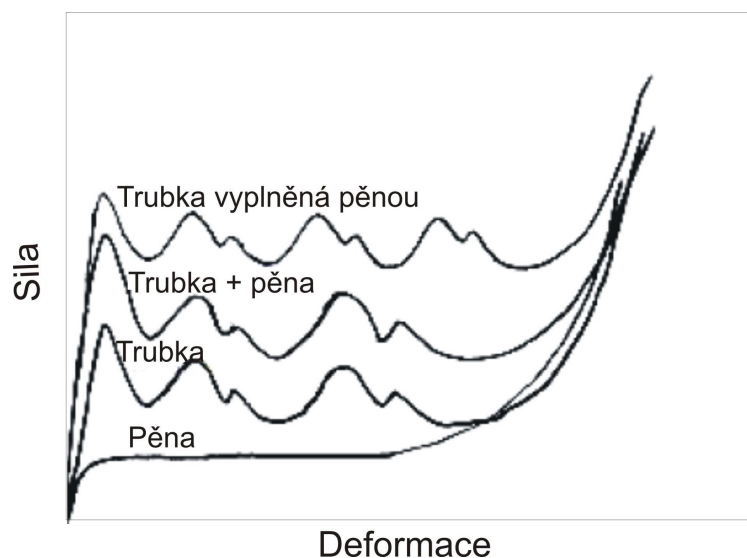
Schopnost materiálu absorbovat energii lze stanovit vyhodnocením křivky napětí – deformace, znázorněné na obrázku 3.15 vlevo. Na křivce lze vyznačit tři oblasti: první odpovídá lineární elastické deformaci vzorku, na konci této oblasti se může objevit špička. Druhá oblast znázorňuje deformaci při konstantním napětí a v třetí oblasti probíhá prudké zvýšení napětí z důvodu zpevnění materiálu deformací. Na materiály určené k pohlcování nárazové energie existují následující požadavky: první špička na grafu má být co nejnižší a oblast č. 2 má být dlouhá a nejlépe bez výkyvů. Energie absorbovaná jednotkovým objemem materiálu odpovídá oblasti pod křivkou napětí – deformace a je označena na obrázku 3.15 vpravo [8, 33].



**Obr. 3.15** Průběh křivky napětí – deformace při tlakové zkoušce [33, 8]

Společnost Cymat na základě provedených zkoušek přišla k závěru, že pevná součást vyplněná kovovou pěnou má mnohem vyšší hodnotu absorpce energie, než je suma absorbovaných energií kovovou pěnou a dutou součástmi. Příčinou je vzájemné působení obalového a výplňového materiálu, kdy součást vyplněná pěnou se při deformaci více vlní po délce a tím se zvětšuje množství absorbované energie. Účinek takového působení je schematicky znázorněn na obr. 3.16 a pohled na deformační součást uvádí obr. 3.17. [8].





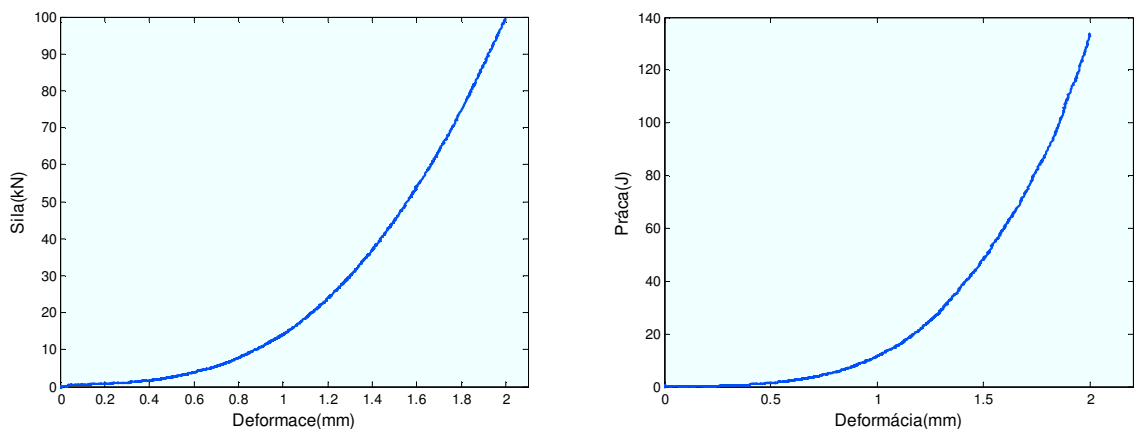
**Obr. 3.16** Porovnání deformačních křivek [8]



**Obr. 3.17** Pohlcovač nárazu hranatého a kulatého tvaru [8]

S cílem ověřit, jak se vyrobené pórovité kovové materiály budou chovat při zatížení, a prozkoumat jejich schopnost absorbovat energii se na vybraných vzorcích prováděla tlaková zkouška. Zkouška se prováděla na multifunkčním hydraulickém zařízení LFV 100 kN při konstantní deformační rychlosti  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

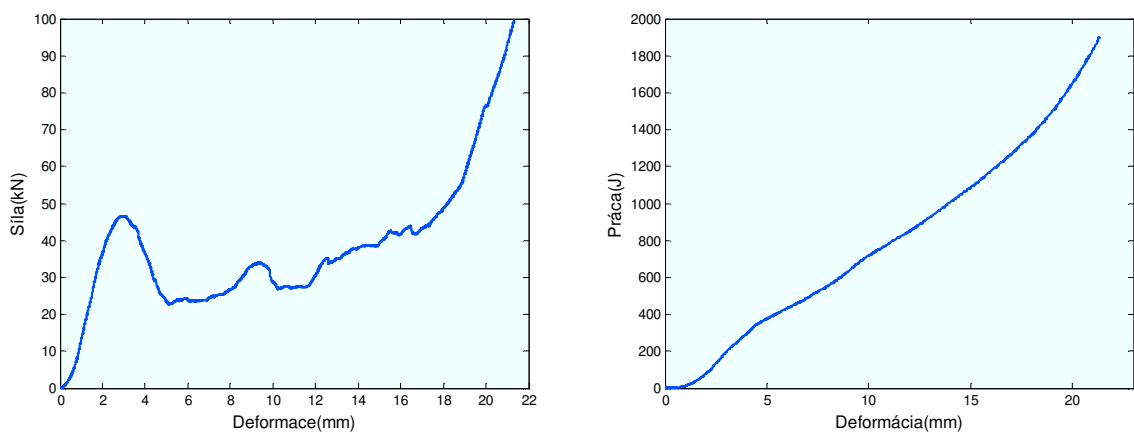
Pro zkoušku byly použity celkem čtyři vzorky. Jako první se zkoušel odlitek z pevného materiálu (bez úmyslně vytvořených mezer ve struktuře). Sledovalo se deformační chování materiálu při konstantním zatížení, odpovídající tlakové křivce a hodnotila se závislost tlakové práce na deformaci (obr. 3.18).



**Obr. 3.18** Vlevo: Tlaková křivka vzorku č. 1. Vpravo: Tlaková práce

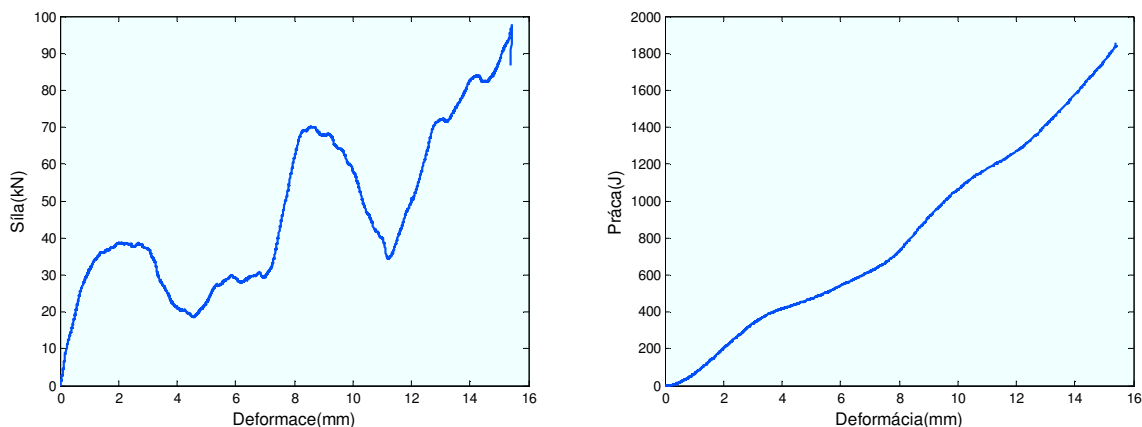
V případě vzorku č.1 došlo k maximálnímu stlačení o velikosti 2 mm, což představuje relativní stlačení o velikosti 6,67 %. Práce při skončení zkoušky byla rovná 133,99 J.

Druhý vzorek představoval mřížový odlitek s průchozími otvory (obr. 3.11 vlevo). Maximální stlačení vzorku dosahovalo 21,3 mm a odpovídalo relativnímu stlačení 71%. Práce při skončení zkoušky byla rovná 1900,9 J. Křivky na obrázku 3.19 znázorňují závislost síly na deformaci a práce na deformaci pro vzorek č. 2.



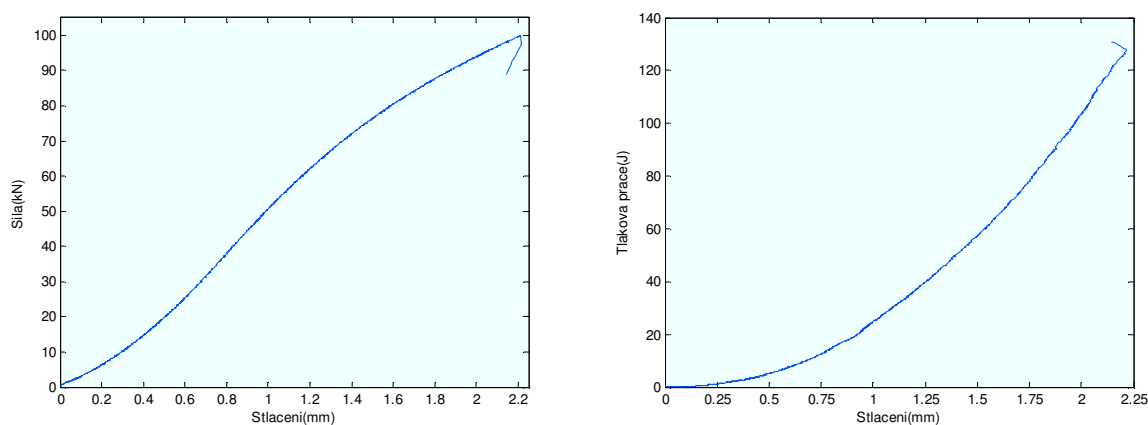
**Obr. 3.19** Vlevo: Tlaková křivka vzorku č. 2. Vpravo: Tlaková práce

Mřížový odlitek s přesazenými otvory (obr. 3.11 vpravo) se zkoušel jako vzorek č. 3. Došlo k maximálnímu stlačení o velikosti 15,4 mm, odpovídající relativnímu stlačení o velikosti 51,3 %. Práce při skončení zkoušky byla rovná 1854,3 J. Příslušné křivky pro vzorek č. 3 uvádí obrázek 3.20.



**Obr. 3.20** Vlevo: Tlaková křivka vzorku č. 3. Vpravo: Tlaková práce

Jako poslední se zkoušel vzorek s pevnou povrchovou vrstvou a mřížovou vnitřní strukturou (obr. 3.13). Tlak působil na pevné plochy odlitku. Maximálnímu stlačení se rovnalo 2,14 mm, tj. 4,37 %. Práce při skončení zkoušky byla rovná 130,91 J. Grafické znázornění tlakové křivky a tlakové práce pro vzorek č. 4 je představeno na obrázku 3.21.



**Obr. 3.21** Vlevo: Tlaková křivka vzorku č. 4. Vpravo: Tlaková práce

Z výsledků tlakové zkoušky je patrné, že vzorek č. 1 má daleko nižší hodnoty stlačení a tlakové práce než vzorky s označením 2 a 3. Tenhle fakt je způsoben tím, že materiál č. 1 byl v celistvém stavu bez vzduchových mezer, které způsobují snadnější deformaci materiálu. Tlakové práce pro vzorky 2 a 3 se prakticky neliší naproti tomu, že stlačení vzorku 2 je cca o 20 % vyšší. Hodnota tlakové práce pro vzorek č. 4 byla daleko nižší, než u vzorků 2 a 3. To je z důvodu, že tlak působil na plochu bez otvorů. Rozměry vzorků a naměřené hodnoty deformaci a tlakové práci zahrnuje tabulka 3.3.

**Tabulka 3.3** Výsledky tlakové zkoušky

Číslo vzorku	Rozměr vzorku, [mm]	Deformace, [%]	Práce, [J]
1	60 x 60 x 31	6,67	133,99
2	60 x 51 x 31	71	1900,9
3	61 x 60 x 31	51,3	1854,3
4	75 x 50 x 35	4,37	130,91

Jak je patrné z výsledků tlakové zkoušky, materiály s mřížovou strukturou (vzorky č. 2 a 3) při deformaci pohltily cca patnáctinásobek energie, absorbované pevným materiálem. Předpokládá se, že materiál s jemnější mřížovou strukturou by prokázal ještě lepší schopnost absorbování deformační energie.

Mřížový materiál s pevnou povrchovou vrstvou při působení tlaku na pevnou plochu má podobné chování, jako materiál bez vzduchových mezer, tj. nevykazuje schopnost k pohlcování energie. Z toho hlediska použití daného materiálu pro účely tlumení nárazové síly nepřipadá v úvahu. Ale při podobném chování při tlakovém zatížení jako u plného materiálu, má mřížový odlitek nižší relativní hmotnost, což slouží jako předpoklad pro jeho možné použití pro výrobu lehkých odlitků s pórovitým jádrem, nebo naopak pro vyztužení duté součástky, což by mělo zlepšit její provozní vlastnosti při nepatrném zvýšení hmotností.

## Závěr

V diplomové práci byly popsány kovové pěny, které díky svým vlastnostem, jako je například nízká relativní hmotnost, nehořlavost, schopnost absorbování zvuku a energie atd., se staly perspektivním materiálem a našly uplatnění v různých průmyslových oborech. Pěnové polotovary a odlitky z pěnových kovů se používají v automobilovém, leteckém a lodním průmyslu, ve stavebnictví, dopravě aj. Používají se pro lehké a pevné konstrukce, tlumiče šumu, výměníky tepla, filtry, deformační zóny automobilů, lehké pancíře obrněné vojenské techniky a pro řadu dalších výrobků.

V teoretické části práce byly vylíčeny metody výroby kovových pěn, vyjmenovány výhody a nedostatky jednotlivých výrobních postupů. Byly popsány vlastnosti pěn, vyhotovených konkrétní metodou a jejich oblasti použití. Většina vyráběných pěn je komerčně dostupná a je známa pod obchodními názvy Cymat, Alulight, Alporas, Duocel atd.

V rámci praktické části se vybrané metody ověřily v praxi. Hlavním kritériem pro volbu metody byla její jednoduchost a dostupnost v konkrétních provozních podmínkách. Technologie s použitím výplňového materiálu – prekursorů – se prokázala jako jednoduchá v aplikaci, ale nezabezpečovala výrobu materiálu s reprodukovatelnými vlastnostmi. Získat materiál s pravidelným uspořádáním dutin se podařilo použitím odpařitelného modelu s mřížovou strukturou. Odlitek s pevnou povrchovou vrstvou a pravidelnou pórovitou strukturou se vyrobil pomocí mřížového jádra vyhotoveného z formovací směsi. Velice jemná kovová pěna s vysokou pórovitostí byla získána při použití odpařitelného modelu z polymerní pěny.

V porovnání s pevným materiálem bez dutin mají pórovité kovové materiály schopnost pohlcovat mnohem větší množství energie při deformaci. Tato skutečnost umožňuje jejich použití pro výrobu konstrukcí určených k tlumení nárazové síly. Další možné uplatnění spočívá ve výrobě lehkých konstrukcí s pórovitými jádry, kde se předpokládá zachování dobrých mechanických vlastností odlitků při značném snížení jejich hmotnosti a úspoře materiálu.

## Seznam použité literatury

- [1] KOERNER, Carolin. *Integral Foam Molding of Light Metals: Technology, Foam Physics and Foam Simulation*. Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 223 s. ISBN: 978-3-540-68838-9, e-ISBN: 978-3-540-68839-6.
- [2] BANHART, John. *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams* [online]. Progress in Materials Science, 2001, 46, s. 559–632. [cit. 2010-11-10]. URL: <<http://www.aluminiumschaum.de/papers/banhart01d.pdf>>.
- [3] MICHNA, Štefan, et al. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, s.r.o., 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [4] LEFEBVRE, Louis-Philippe – BANHART, John – DUNAND, David C. *Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments*. Advanced engineering materials, 2008, 10, No. 9, s. 775-787.
- [5] BANHART, John. *Aluminium foams for lighter vehicles*. International Journal of Vehicle Design, 2003, s. 1–19.
- [6] CURRAN, David, C. *Aluminium Foam Production using Calcium Carbonate as a Foaming Agent* [online]. Cambridge, December 2003. 188 s. Dizertační práce. University of Cambridge. [cit. 2010-12-10]. URL: <[http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/publications/thesis/2003-12\\_DCC\\_PhD\\_thesis.pdf](http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/publications/thesis/2003-12_DCC_PhD_thesis.pdf)>.
- [7] BANHART, John. *Metal Foams - from Fundamental Research to Applications* [online]. Frontiers in the Design of Materials. Universities Press Limited, India. 2007, s. 279-289. [cit. 2011-01-05]. URL: <[http://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/B-Conferences/b097\\_banhart2007.pdf](http://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/B-Conferences/b097_banhart2007.pdf)>.
- [8] Technical manual for CYMAT: Smart Metal [online]. Cymat Corp., Canada, 2009. [cit. 2010-07-05]. URL: <<http://cymat.com>>.
- [9] Product information [online]. Alulight International GmbH. [cit. 2011-02-13].



URL: < <http://www.alulight.com>>.

[10] MIYOSHI, Tetsuji, et al. *ALPORAS Aluminum Foam: Production Process, Properties and Applications* [online]. Advanced Engineering Materials, 2000, 2, No. 4, s. 179-183. [cit. 2011-02-17].

URL: <[http://www.fridman.com/Filer/alporasproduction\\_properties\\_applications.pdf](http://www.fridman.com/Filer/alporasproduction_properties_applications.pdf)>.

[11] BANHART, John. *Properties and Applications of Cast Aluminum Sponges* [online]. Advanced engineering materials, 2000, 2, No. 4, s. 188–191. [cit. 2011-01-29]. URL: <[http://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/A-Journals/a043\\_banhart2000.pdf](http://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/A-Journals/a043_banhart2000.pdf)>.

[12] AMJAD, Saira. *Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams* [online]. Cambridge, October 2001. Dizertační práce. University of Cambridge. [cit. 2011-02-23]. URL: <<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2000/amjad/a.pdf>>.

[13] Penoaljuminiј KUMZa kak perspektivnyj energopoglasšajusšij element dinamičeski nagražаемых konstrukcij [CD-ROM].

[14] CURRAN, Dave. *Metal Foams* [online]. [cit. 2010-09-20].

URL: <<http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/people/old/dave/>>.

[15] GERGELY, V. – DEGISCHER, H. P. – CLYNE, T. W. *Recycling of MMCs and Production of Metallic Foams* [online]. Comprehensive Composite Materials, 2000, 3, s. 797-820. [cit. 2011-02-13].

URL: <<http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/publications/journal/recmmc38851.pdf>>.

[16] BANHART, John. *Manufacturing Routes for Metallic Foams* [online]. JOM, 2000, 12, 52, s. 22-27. [cit. 2011-02-13].

URL: <<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html>>.

[17] SHAPOVALOV, V. I. - WITHERS, J. C. *Main Types of Gasar Structure and Production Methods* [online]. [cit. 2011-02-13].

URL: <<http://www.metalfoam.net/Papers-conference/2007-Montreal-Paper.pdf>>.

- [18] DRENČEV, Ludmil., et al. *Modelling of structural formation in ordered porosity metal materials* [online]. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 2006, 14, s. 663-675. [cit. 2011-02-13]. URL: <[http://www.eccm2010.org/complet/fullpaper\\_11.pdf](http://www.eccm2010.org/complet/fullpaper_11.pdf)>.
- [19] DRENČEV, L., et al. *Gasars: a class of metallic materials with ordered porosity* [online]. Materials Science and Technology, 2006, Vol. 22, No 10, s. 1135-1147. [cit. 2011-02-14]. URL: <<http://space.qub.ac.uk:8077/cber/Sha/Lists/Publication/Attachments/21/230.pdf>>.
- [20] BABCSAN, N. – BANHART, J. – LEITLMEIER, D. *Metal foams – manufacture and physics of foaming* [online]. International Conference “Advanced metallic materials”, Smolenice, Slovakia, 5–7 November, 2003, s. 5-15. [cit. 2011-02-17]. URL: <[http://www.babcsan.hu/letoltes/babcsan2003\\_AMM03.pdf](http://www.babcsan.hu/letoltes/babcsan2003_AMM03.pdf)>.
- [21] Duocel. ERG, Inc., Oakland, CA. Materials and aerospace corporation. [online]. [cit. 2011-02-23]. URL: <<http://www.ergaerospace.com/index.html>>.
- [22] DOROŠENKO, V. S. *Kopiruja struktury vselennoj: tehnologii buduššego rabotajut uže segodnja*. Metalloobrabatyvajušee oborudovanie, 2008, No. 12 (57), s. 40-44.
- [23] HAYDN, N. - WADLEY, G. *Multifunctional periodic cellular metals* [online]. Phil. Trans. R. Soc. A, 2006, 364, s. 31–68. Published online 2 December 2005. [cit. 2011-02-24]. URL: <[http://www.virginia.edu/ms/pdf/Wadley\\_fac.pdf](http://www.virginia.edu/ms/pdf/Wadley_fac.pdf)>.
- [24] EVANS, A.G., et al. *The topological design of multifunctional cellular metals* [online]. s. 1-40. [cit. 2011-02-23]. URL: <<http://www.cellularmaterials.com/papers/benchmark.pdf>>.
- [25] Federal Technology Group. Supporting Industry and U.S. Federal Laboratories. *Advanced Materials: Cast Lattice Block Structures* [online]. [cit. 2011-02-23]. URL: <[http://www.fedtechgroup.com/advanced\\_materials/lbs/lbs\\_cast.html](http://www.fedtechgroup.com/advanced_materials/lbs/lbs_cast.html)>.
- [26] MA, Liqun - SONG, Zhenlun – HE, Deping. *Cellular structure controllable aluminium foams produced by high pressure infiltration process*. Scripta Materialia, 1999, Vol. 41, No. 7, s. 785–789.

[27] FINKELŠTEJN, A. B. *Teorija i praktika polučeníja poristych otlivok iz aljuminievych splavov propitkoj* [online]. Ekaterinburg, 2010. Dizertační práce. UGTU-UPI. [cit. 2010-12-10].

URL:<<http://vak.ed.gov.ru/common/img/uploaded/files/vak/2010/announcements/techn/25-01/FinkelshteynAB.pdf>>.

[28] IPM Laboratory, University of Virginia. *Porous Materials Modeling Research* [online]. [cit. 2011-03-02]. URL: <[http://www.ipm.virginia.edu/research/PM/Mod/ldc\\_model.htm](http://www.ipm.virginia.edu/research/PM/Mod/ldc_model.htm)>.

[29] BANHART, J. – BAUMEISTER, J. *Production methods for metallic foams* [online]. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 1998, vol. 521, s. 121-132. [cit. 2011-03-05]. URL: <[http://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/B-Conferences/b022\\_banhart1998.pdf](http://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/B-Conferences/b022_banhart1998.pdf)>.

[30] SRIVASTAVA, V. C. – SAHOO, K. L. *Processing, stabilization and applications of metallic foams: Art of science* [online]. Materials Science-Poland, 2007, Vol. 25, No. 3, s. 733–753. [cit. 2010-12-05]. URL: <[http://materialsscience.pwr.wroc.pl/bi/vol25no3/articles/ms\\_18sriv.pdf](http://materialsscience.pwr.wroc.pl/bi/vol25no3/articles/ms_18sriv.pdf)>.

[31] DOUGLAS, T., et al. *Synthesis of open-cell metal foams by templated directed vapor deposition* [online]. J. Mater. Res., 2001, Vol. 16, No. 4, s. 1028–1036. [cit. 2011-03-05]. URL:<[http://www.ipm.virginia.edu/newpeople/wadley/PDF/Synthesis\\_Open\\_Cell\\_Metal\\_Foams.pdf](http://www.ipm.virginia.edu/newpeople/wadley/PDF/Synthesis_Open_Cell_Metal_Foams.pdf)>.

[32] DNEP. Databáze nabídek, expertů a přístrojů ČVUT [online]. [cit. 2011-04-26]. URL: <[https://dnep.cvut.cz/zobraz.php?id\\_data=447](https://dnep.cvut.cz/zobraz.php?id_data=447)>.

[33] GAILLARD, Yves, et al. *CTIF's aluminium foams made by foundry processes*. Fonderie – Fondateur d'aujourd'hui, 2005, No. 250, s. 13–24.